



**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κατασκευή Ψηφιακού Διδύμου ως Σύστημα  
Παρακολούθησης Κυκλοφορίας**

Βλαχάκης Βασίλης

**Επιβλέπων:** Δρ. Πρωτοψάλτης Αντώνιος

Κοζάνη, Ιούλιος 2022

**Τίτλος** Κατασκευή Ψηφιακού Διδύμου ως Σύστημα Παρακολούθησης Κυκλοφορίας

**Περιγραφή** Διπλωματική εργασία στα πλαίσια των σπουδών για την απόκτηση του Διπλώματος που απονέμει το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας με τίτλο «Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Πληροφορικής»

**Λέξεις κλειδιά** Ψηφιακό δίδυμο, προσομοίωση, όγκος κίνησης, βελτιστοποίηση

**Ημερομηνία  
Δημιουργίας** 05/01/2022

**Έτος έκδοσης** 2022

**Χώρα έκδοσης** GR

**Γλώσσα  
κειμένου** Gre

## Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο, “ Κατασκευή Ψηφιακού Διδύμου ως Σύστημα Παρακολούθησης Κυκλοφορίας ”, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Πρωτοψάλτη Αντώνη, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Βλαχάκης Βασίλης & Πρωτοψάλτης Αντώνιος, 2022, Κοζάνη

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα ψηφιακό δίδυμο που αφορά στην παρακολούθηση της κυκλοφορίας.

Τα ψηφιακά δίδυμα είναι λογισμικά που μπορούν να αντιγράψουν και να μεταφέρουν ένα σύστημα από τον φυσικό κόσμο στον ψηφιακό. Τα ψηφιακά δίδυμα μεταφέρουν στον ψηφιακό κόσμο όλες τις πτυχές που περιέχει μια φυσική οντότητα, το μέγεθος, το σχήμα, την αντοχή του υλικού, τις λειτουργίες και τις αλληλεπιδράσεις που υπάρχουν μεταξύ των οντοτήτων στα πλαίσια του συστήματος.

Το συγκεκριμένο ψηφιακό δίδυμο αφορά στην παρακολούθηση της κυκλοφορίας, περιέχει δηλαδή τις πληροφορίες που αφορούν στην κίνηση στους δρόμους, στον όγκο της κίνησης στους δρόμους, στην μορφολογία του οδικού δικτύου, στροφές, ευθείες, διασταυρώσεις. Αφορούν επίσης στον κώδικα οδικής κυκλοφορίας, φανάρια, προτεραιότητες, όρια ταχύτητας, κατεύθυνση των δρόμων, στις οδικές συμπεριφορές, το πότε δηλαδή ο οδηγός επιταχύνει ή μειώνει ταχύτητα, τις συχνές διαδρομές που επιλέγει ένας οδηγός. Αναφέρεται επίσης στις φυσικές λειτουργίες των οντοτήτων που απαρτίζουν το σύστημα, στην ταχύτητα, στο μέγεθος και στον όγκο των οχημάτων, στο μέγεθος των δρόμων.

Η δημιουργία καινούριων οδικών δικτύων ή η βελτιστοποίηση των όσων υπάρχουν είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί πολύ χρόνο για να γίνει και έχει μεγάλο κόστος. Ένας ερευνητής πριν ξεκινήσει ένα έργο όπως την δημιουργία ενός νέου τμήματος οδικού δικτύου πρέπει να είναι σίγουρος ότι το δίκτυο θα μπορέσει να ανταποκριθεί στις ανάγκες που υπάρχουν και δεν θα δημιουργηθούν προβλήματα κατά την κίνηση πάνω σε αυτό.

Χρησιμοποιώντας το ψηφιακό δίδυμο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας ο ερευνητής μπορεί να μελετήσει το κομμάτι του οδικού δικτύου που αναπαριστάται στο ψηφιακό δίδυμο, να προσομοιώσει την κίνηση στους δρόμους και να βγάλει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το αν δημιουργούνται προβληματικά σημεία όπως π.χ. σημεία με μποτιλιάρισμα, μπορεί να διαπιστώσει πού βρίσκονται τα σημεία αυτά και να δοκιμάσει διαφορετικούς τρόπους για να επιλύσει το πρόβλημα.

## **Abstract**

In this paper, a digital twin was created that involves traffic monitoring.

Digital twins are software that can copy and transfer a system from the physical world to the digital world. Digital twins transfer to the digital world all the aspects that a physical entity contains, size, shape, hardware strength, functions and interactions that exist between entities within the system.

This particular digital twin is concerned with traffic monitoring, i.e. it contains the information related to traffic on the roads. The volume of traffic on the roads. The morphology of the road network, turns, straights, intersections. The traffic laws, traffic lights, priorities, speed limits, direction of roads. The road behaviours when a driver speeds up or slows down, the frequent routes a driver chooses. The physical functions of the entities that make up the system, speed, size and volume of vehicles, size of roads.

The creation of new road networks or the optimisation of existing ones is a complex process that takes a long time and is very costly. Before starting a project such as the creation of a new section of road network, a researcher must be sure that the network will be able to meet the needs that exist and that there will be no problems when driving on it.

Using the digital twin that was brewed as part of this thesis the researcher can study the part of the road network that created in the digital twin, simulate the traffic on the roads and draw useful conclusions about whether the road network can meet the volume of traffic, in case problematic points are created, points with traffic jams, he can find out where these points are located and try different ways to solve the problem.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	8
1.1 Σκοπός και αναγκαιότητα .....	9
1.2 Περιγραφή του διδύμου.....	10
1.3Επισκόπηση κεφαλαίων.....	11
Κεφάλαιο 2 Τα ψηφιακά δίδυμα.....	12
2.1 Δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου .....	13
Κεφάλαιο 3 Τεχνολογίες και εργαλεία για τα Ψηφιακά Δίδυμα.....	17
3.1 Σύλληψη και έλεγχος φυσικού κόσμου .....	18
3.2 Δημιουργία μοντέλων για τα ψηφιακά δίδυμα .....	20
3.3 Διαχείριση δεδομένων στα ψηφιακά δίδυμα.....	22
3.5 Συνδέσεις στα ψηφιακά δίδυμα.....	25
Κεφάλαιο 4 Σχεδιασμός και υλοποίηση του διδύμου .....	27
4.1 Περιγραφή του διδύμου.....	27
4.2 Ανάλυση χρηστών.....	28
4.3 Ανάλυση απαιτήσεων του διδύμου.....	30
4.4 Σχεδιασμός συστήματος.....	32
4.5 Υλοποίηση συστήματος.....	35
4.5.1 Χρήση της Unity3D και της C#.....	35
4.5.2 Χρήση της MongoDB .....	36
4.5.3 Υλοποίηση.....	39
4.6 Αξιολόγηση ευχρηστίας.....	48
4.6.1 Πειραματική διαδικασία.....	48
4.6.2 Ανάλυση πειραμάτων .....	50
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις .....	54
Βιβλιογραφία .....	56

## Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1 Στιγμιότυπο από προσομοίωση πτήσης.....	15
Εικόνα 2 Στιγμιότυπο από προσομοίωση για την παραγωγή οχημάτων. ....	16
Εικόνα 3 Τεχνολογίες για την κατασκευή Ψηφιακών Διδύμων [1].....	18
Εικόνα 4 Τεχνολογίες για την κατανόηση και τον έλεγχο του φυσικού κόσμου [1] .....	20
Εικόνα 5 Τεχνολογίες για την δημιουργία μοντέλων για τα ψηφιακά δίδυμα [1] .....	21
Εικόνα 6 Τεχνολογίες για την διαχείριση δεδομένων στα ψηφιακά δίδυμα [1].....	23
Εικόνα 7 Τεχνολογίες για τις υπηρεσίες ψηφιακών διδύμων [1] .....	25
Εικόνα 8 Τεχνολογίες για τις συνδέσεις στα ψηφιακά δίδυμα [1] .....	26
Εικόνα 9 Συνδέσεις μοντέλων και σεναρίων κώδικα .....	33
Εικόνα 10 Σύνδεση μεταξύ βάσης και σεναρίων κώδικά.....	34
Εικόνα 11 Χρήση διεπαφής για αλληλεπίδραση με το σύστημα .....	34
Εικόνα 12 Σύνδεση σεναρίων για την αλλαγή χρώματος.....	39
Εικόνα 13 σενάριο κώδικα για την αλλαγή χρώματος στα φανάρια.....	40
Εικόνα 14 δρόμος μιας λωρίδας.....	40
Εικόνα 15 δρόμος δύο λωρίδων .....	40
Εικόνα 16 διασταύρωση.....	41
Εικόνα 17 όχημα .....	41
Εικόνα 18 μπλε περιοχές στις οποίες μπορεί να κινηθεί το όχημα.....	42
Εικόνα 19 Οι σφαίρες των way point .....	42
Εικόνα 20 Σενάριο κώδικα το όχημα αλλάζει δρόμο και παίρνει τον επόμενο στόχο .....	43
Εικόνα 21 Συνδέσεις μεταξύ των σεναρίων .....	43
Εικόνα 22 Χρήση αισθητήρων.....	44
Εικόνα 23 Σενάριο κώδικα για την δημιουργία αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων .....	44
Εικόνα 24 Σύνδεση μεταξύ των σεναρίων.....	45
Εικόνα 25 Διασταύρωση, πράσινο και κόκκινο φανάρι.....	45
Εικόνα 26 Σενάριο για την εισαγωγή δεδομένων από την βάση.....	46
Εικόνα 27 Σύνδεση μεταξύ των σεναρίων.....	46
Εικόνα 28 Menu για την επιλογή δρόμων.....	47
Εικόνα 29 Στιγμιότυπο από την λειτουργία της προσομοίωσης.....	48

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Τα ψηφιακά δίδυμα είναι μια σύγχρονη καινοτομία. Σκοπός των ψηφιακών διδύμων είναι να δημιουργήσουν ένα πιστό αντίγραφο από ένα σύστημα που βρίσκεται στον φυσικό κόσμο και να το μεταφέρουν στον ψηφιακό. Αυτό το σύστημα μπορεί να είναι οτιδήποτε ένας ερευνητής θέλει να μελετήσει, μπορεί να είναι κάτι μικρό σαν την μηχανή ενός αυτοκινήτου, η κάτι μεγάλο σαν την γραμμή παραγωγής σε ένα εργοστάσιο. Σε τέτοιες περιπτώσεις το ψηφιακό δίδυμο καλείται να αποτυπώσει στον ψηφιακό κόσμο όλα τα μέρη από τα οποία αποτελείται το σύστημα, τα διάφορα μηχανικά κομμάτια, τον τρόπο με τον οποίο αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους καθώς και τις φυσικές τους ιδιότητες, τον τρόπο που συμπεριφέρονται, τον τρόπο που κινούνται και το αποτέλεσμα που παράγουν. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν ακόμα να προσομοιώσουν άυλες πτυχές του συστήματος όπως για παράδειγμα τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και συμμετέχουν στην παραγωγή για να βγει το τελικό αποτέλεσμα.

Η ρύθμιση και βελτιστοποίηση των συστημάτων του φυσικού κόσμου είναι μια χρονοβόρα και με μεγάλο κόστος διαδικασία. Κάθε αλλαγή χρειάζεται χρόνο για να εφαρμοστεί στο σύστημα και να φανεί ο τρόπος που επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα του συστήματος. Οι αλλαγές που γίνονται σε ένα σύστημα στον φυσικό κόσμο επιφέρουν αύξηση του κόστους, μπορεί να χρειαστεί να γίνουν αρκετές αλλαγές μέχρι η αποδοτικότητα του συστήματος να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Η μελέτη των συστημάτων μακριά από το φυσικό περιβάλλον, είναι μια διαδικασία που συχνά δεν λαμβάνει υπόψη της όλες τις πτυχές του φυσικού περιβάλλοντος. Έτσι μελέτες που γίνονται στο εργαστήριο ή στο γραφείο μπορεί να έχουν διαφορετική εφαρμογή στο φυσικό περιβάλλον. Τα ψηφιακά δίδυμα δημιουργήθηκαν για να εξαλείψουν, στον βαθμό που είναι εφικτό, αυτό το κενό.

Τα ψηφιακά δίδυμα δίνουν την δυνατότητα σε επιχειρήσεις και ερευνητές να φτιάξουν υψηλής πιστότητας αντίγραφα για να μπορέσουν να μελετήσουν και να βελτιστοποιήσουν την αποδοτικότητα των συστημάτων τους, να λύσουν και να προβλέψουν προβλήματα στην παραγωγή. Μελετώντας τα ψηφιακά δίδυμα των συστημάτων τους μπορούν να κάνουν προσομοιώσεις για να μελετήσουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί κάθε σύστημα, να ελέγξουν το τελικό προϊόν, να εντοπίσουν τυχόν λάθη και να βρουν τρόπους να βελτιστοποιήσουν τα συστήματα τους με χαμηλό κόστος.



Η δημιουργία ενός ψηφιακού δίδυμου είναι μια διαδικασία πολύπλοκη και πολυπαραγοντική, καθώς απαιτεί την μελέτη του συστήματος από όλες τις πτυχές του, εμπλέκοντας διαφορετικά γνωστικά αντικείμενα, φυσική, μαθηματικά, μηχανική και άλλα. Επομένως, ερευνητές με διαφορετικές ειδικότητες χρειάζονται για να μελετήσουν τα αντίστοιχα αντικείμενα που απαιτούνται ώστε να εξαχθούν πληροφορίες και παράμετροι για να δημιουργηθεί το ψηφιακό δίδυμο.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την εξέλιξη σε συγκεκριμένους τομείς της πληροφορικής όπως το Internet of things, την υπολογιστική νέφους και την ανάλυση μεγάλων δεδομένων, η ψηφιοποίηση του φυσικού κόσμου γίνεται πράξη ολοένα και περισσότερο επιτρέποντας έτσι την δημιουργία υψηλής πιστότητας αντιγράφων. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να προσφέρουν πολλές δυνατότητες σε επιχειρήσεις και ερευνητές όπως π.χ. η μείωση του κόστους της παραγωγικής διαδικασίας, ο καλύτερος έλεγχος και σχεδιασμός της κ.α.

## **1.1 Σκοπός και αναγκαιότητα**

Η σύγχρονη αστικοποίηση και άλλοι παράγοντες έχουν επιβαρύνει τα παλαιωμένα αστικά οδικά δίκτυα με μεγάλο όγκο οχημάτων τον οποίο σε πολλές περιπτώσεις, δεν ήταν σχεδιασμένα από την αρχή να τον δεχτούν. Ως αποτέλεσμα, στις ημέρες μας, η ύπαρξη κυκλοφοριακών προβλημάτων είναι ένα καθημερινό σύγχρονο πρόβλημα για τις πόλεις. Το καθημερινό πλέον φαινόμενο, ειδικά στις μεγάλες πόλεις, της κυκλοφοριακής συμφόρησης προκαλεί καθυστερήσεις σε όλες τις πτυχές της καθημερινότητας πολλών ανθρώπων. Οι καθυστερήσεις αυτές δημιουργούν προβλήματα στην μεταφορά προϊόντων, στις καθημερινές εργασίες των ανθρώπων και επηρεάζουν αρνητικά τους οδηγούς προκαλώντας πολλές φορές θυμό, εκνευρισμό με αποτέλεσμα να αυξάνονται και τα τροχαία ατυχήματα.

Ο τρόπος για να λυθούν αυτά τα προβλήματα είναι η βελτίωση και ο επανασχεδιασμός των οδικών δικτύων που όμως δεν είναι μια εύκολη διαδικασία. Ο εντοπισμός των προβληματικών σημείων και η δημιουργία νέων δρόμων ή η αλλαγή των υπαρχόντων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολύ χρόνο για να γίνει και έχει μεγάλο κόστος. Για να ξεκινήσει αυτή η διαδικασία πρέπει ο ερευνητής να μαζέψει πολλά δεδομένα που σχετίζονται με την αναγνώριση των προβληματικών σημείων αλλά και με το ποιες αλλαγές θα λύσουν το πρόβλημα. Η αλλαγές στο

οδικό δίκτυο μια πόλης, όπως λ.χ. το να δημιουργηθεί ένας νέος δρόμος, εκτός από το μεγάλο κόστος που έχει είναι και μια μη αναστρέψιμη διαδικασία οπότε η επιτυχία είναι μονόδρομος.

Σκοπός της διπλωματικής είναι να δημιουργηθεί ένα εργαλείο που να δίνει την δυνατότητα στους ειδικούς μηχανικούς χωροτάκτες να πάρουν αποφάσεις σχετικά με τον επανασχεδιασμό των οδικών δικτύων που μελετούν. Το ψηφιακό δίδυμο οπτικοποιεί τα δεδομένα της τρέχουσας κατάστασης του οδικού δικτύου, που έχουν ήδη συλλεγεί σε μία NOSQL βάση δεδομένων, δημιουργώντας μία υψηλής πιστότητας προσομοίωση. Το δίδυμο αναπαριστά το οδικό δίκτυο σαν μια φυσική οντότητα που περιέχει τους κανόνες και τους νόμους οδικής κυκλοφορίας, και πληροφορίες σχετικά με τις αποφάσεις και τις συμπεριφορές τους στο οδικό δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο οι ερευνητές μπορούν να έχουν μια ρεαλιστική απεικόνιση της τρέχουσας κατάστασης. Το δίδυμο δίνει την δυνατότητα στους ερευνητές να κάνουν αλλαγές στην προσομοίωση για να δουν τα αποτελέσματα που αυτές θα επιφέρουν στην προσομοίωση και κατ' επέκταση στον φυσικό κόσμο δίχως αρχικά να επηρεάζεται το φυσικό δίδυμο, ενώ όταν παρθεί η τελική απόφαση από τους ειδικούς χρήστες οι αλλαγές να μεταφέρονται άμεσα στον φυσικό κόσμο με το πάτημα ενός κουμπιού.

## 1.2 Περιγραφή του διδύμου

Το ψηφιακό δίδυμο που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής είναι ένα εργαλείο που μπορεί να οπτικοποιήσει δεδομένα που λαμβάνονται από τον φυσικό κόσμο ενός αστικού οδικού δικτύου, και να βοηθήσει τον ερευνητή να βελτιώσει τις αποφάσεις που καλείται να λάβει για να λύσει το υπάρχον κυκλοφοριακό πρόβλημα. Το ψηφιακό δίδυμο αναπαριστά το κεντρικό οδικό δίκτυο της πόλης του Βόλου, που αντιμετωπίζει συχνά προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το ψηφιακό δίδυμο δίνει την δυνατότητα στον ερευνητή να οπτικοποιήσει την τρέχουσα κατάσταση του οδικού δικτύου μέσα στον υπολογιστή του, να εκτελέσει προσομοιώσεις κίνησης με διάφορες παραμέτρους οι οποίες θα του δώσουν την δυνατότητα να μελετήσει διάφορες επιλογές ώστε να επιλέξει τις κατάλληλες ρυθμίσεις των φαναριών. Επιπλέον, μπορεί να προσθέσει όγκο κίνησης σε κάθε οδικό άξονα ώστε να εκτελέσει εικονικά σενάρια προσομοίωσης στο ψηφιακό δίδυμο για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων.

### **1.3Επισκόπηση κεφαλαίων**

Στην συνέχεια του κειμένου στο κεφάλαιο 2 θα παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο των ψηφιακών διδύμων, τι είναι, πώς ξεκίνησαν και τι μπορούν να προσφέρουν. Το υπόβαθρο αυτό στηρίζεται σε έρευνα που έχει ήδη γίνει και η έρευνα αυτή αναφέρεται αναλυτικότερα στην βιβλιογραφία. Στο κεφάλαιο 3 θα αναλυθούν οι απαραίτητες τεχνολογίες και τα εργαλεία που χρειάζονται για να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό δίδυμο. Στη συνέχεια στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η ανάλυση, ο σχεδιασμός και η διαδικασία υλοποίησης του ψηφιακού διδύμου του οδικού δικτύου της πόλης του Βόλου. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται λόγος για μελλοντικές επεκτάσεις του ψηφιακού διδύμου για να γίνει ακόμα πιο χρήσιμο για αποδοτικό.

## Κεφάλαιο 2 Τα ψηφιακά δίδυμα

Τα ψηφιακά δίδυμα κάνανε την εμφάνιση τους το 2003 και πολλοί ορισμοί δόθηκαν για να τα περιγράψουν. Ο πιο ευρέως αποδεκτός, είναι ο ορισμός που έδωσαν το 2012 οι Glaessegan και Stargel και λέει ότι τα ψηφιακά δίδυμα είναι μια προσομοίωση, με ενσωματωμένη φυσική, κλίμακες και πιθανότητες, που αφορά ένα προϊόν και χρησιμοποιεί τις καλύτερες τεχνολογίες για να απεικονίσει τον κύκλο ζωής του προϊόντος [2]. Τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούνται από τρία μέρη: το φυσικό προϊόν, το ψηφιακό και τα δεδομένα που τα ενώνουν [2]. Τα βασικά χαρακτηριστικά των ψηφιακών διδύμων, βάσει του παραπάνω ορισμού είναι τρία:

1) Αναπαράσταση σε πραγματικό χρόνο. Ο φυσικός κόσμος μπορεί να αναπαρασταθεί στον ψηφιακό με συγχρονισμό σε πραγματικό χρόνο και με υψηλή πιστότητα [2].

2) Αλληλεπίδραση και συσχέτιση των στοιχείων που υπάρχουν στον φυσικό κόσμο. Τα δεδομένα που παράγονται στα διάφορα στάδια του φυσικού κόσμου μπορούν να συνδεθούν στον ψηφιακό. Το ψηφιακό δίδυμο συλλέγει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και με την βοήθεια τεχνολογιών που αφορούν στην επεξεργασία δεδομένων μπορεί να αποθηκεύσει και να συνδέσει τα δεδομένα που αφορούν διαφορετικές περιόδους για να συνδέσει το παρόν με το παρελθόν [2].

3) Αυτο-εξέλιξη. Το ψηφιακό δίδυμο έχει την δυνατότητα να επεξεργάζεται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να συγκρίνει τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο. Αυτό του δίνει την δυνατότητα να εξελίσσεται και να βελτιώνεται συνεχώς [2].

Από την εμφάνιση τους τα ψηφιακά δίδυμα έχουν εφαρμοστεί σε πολλά πεδία και δείχνουν να έχουν μεγάλες προοπτικές. Η αμερικάνικη αεροπορία και αρκετοί άλλοι ερευνητές αρχικά χρησιμοποίησαν τα ψηφιακά δίδυμα για να φτιάξουν προσομοιώσεις που αποτυπώνουν με ακρίβεια τον φυσικό εναέριο κόσμο, την κίνηση των ιπτάμενων οχημάτων και κατάφεραν έτσι να ελέγξουν τις φθορές και την συντήρησή τους [1]. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να απεικονίσουν με μεγάλη λεπτομέρεια τον φυσικό κόσμο. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως στο κομμάτι των αερομεταφορών και των διαστημικών μεταφορών για να γίνουν προβλέψεις σχετικά με την πιθανότητα αποτυχίας του εξοπλισμού αλλά και την μείωση του κόστους συντήρησης [1]. Τα χαρακτηριστικά του ψηφιακού διδύμου φαίνεται ότι μπορούν να λύσουν πολλά προβλήματα που αφορούν στον σχεδιασμό ενός προϊόντος.

Η αύξηση στην δημοτικότητα τους οφείλεται στην κατεύθυνση ότι ο πραγματικός και ψηφιακός κόσμος είναι συνδεδεμένοι και μπορούν να αποτελέσουν ένα σύνολο [1]. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε από ερευνητές και ερευνητικά κέντρα για ερευνητικούς σκοπούς και αργότερα ενσωματώθηκε στην παραγωγή και έτσι άρχισε το ενδιαφέρον περισσότερων ατόμων να επικεντρώνεται στα ψηφιακά δίδυμα [1]. Έτσι οι Grieves και Tao δημιούργησαν μια βάση για τα ψηφιακά δίδυμα που αποτελείται από ένα σύστημα πέντε διαστάσεων στο οποίο περιγράφονται οι σχέσεις και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φυσικών οντοτήτων, των ψηφιακών μοντέλων, των υπηρεσιών, των δεδομένων και των συνδέσεων [1]. Οι φυσικές οντότητες αναπαριστώνται με ακριβή τρόπο, τα ψηφιακά μοντέλα είναι πιστά αντίγραφα του φυσικού κόσμου και των σχέσεων που τον διέπουν [1]. Τα δεδομένα αφορούν όλες τις πληροφορίες που υπάρχουν μέσα στο σύστημα για τις σχέσεις και τις λειτουργίες των οντοτήτων [1]. Οι υπηρεσίες αφορούν όλες τις υπηρεσίες που παρέχει το σύστημα στους χρήστες αλλά και τις υπηρεσίες που απαιτεί το σύστημα όπως αναβαθμίσεις, δεδομένα κ.α. [1]. Τέλος οι συνδέσεις είναι οι συνδέσεις μεταξύ των μελών του ψηφιακού διδύμου.

## **2.1 Δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου**

Όπως προαναφέρθηκε τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να αναπαραστήσουν ακριβώς κάθε σύστημα που υπάρχει στον πραγματικό κόσμο. Μπορούμε έτσι να πάρουμε πληροφορίες για την καλύτερη χρήση πόρων, την μείωση κόστους και την αποφυγή καταστροφικών αποτυχιών σε ξεχωριστά και συγκεκριμένα σενάρια που μας ενδιαφέρουν. Το ζήτημα που προκύπτει είναι ότι για να γίνει η αναπαράσταση του φυσικού κόσμου στον ψηφιακό απαραίτητη είναι η πλήρη κατανόηση του φυσικού κόσμου, διαφορετικά το δίδυμο δεν θα ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Η δημιουργία ενός αποδοτικού διδύμου είναι μια δύσκολη διαδικασία. Το δίδυμο πρέπει να είναι καλά σχεδιασμένο, να προσαρμόζεται εύκολα στις απαιτήσεις, να έχει χαμηλές λειτουργικές απαιτήσεις, να είναι εύχρηστο και να παρέχει στους χρήστες τις λειτουργίες που χρειάζονται για να αντλούν πληροφορίες για το σύστημα που μελετάνε.

Η διαδικασία μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη : την εννοιολογική σχεδίαση, το λεπτομερές σχέδιο και την εικονική επαλήθευση [2]. Η εννοιολογική σχεδίαση είναι το πρώτο και το πιο βασικό στάδιο [2]. Εδώ οι σχεδιαστές καθορίζουν τον σκοπό, τις λειτουργίες και την αισθητική του αντικειμένου λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες των πελατών, τον ανταγωνισμό, τις

επενδύσεις και μια σειρά από άλλες πληροφορίες [2]. Το πρόβλημα σε αυτή τη διαδικασία είναι ότι οι σχεδιαστές πρέπει να συλλέξουν και να επεξεργαστούν όλα αυτά τα δεδομένα.

Αξιοποιώντας όμως τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να έχουν ένα ακριβές αντίγραφο του προϊόντος και μπορούν έτσι να το αξιολογήσουν, να δουν τις απόψεις των χρηστών και να βελτιστοποιήσουν το προϊόν. Μόλις το κομμάτι αυτό τελειώσει έρχεται το λεπτομερές σχέδιο [2]. Σε αυτό το στάδιο φτιάχνεται ένα πρωτότυπο του προϊόντος, ψηφιακό ή φυσικό [2]. Αυτό το πρωτότυπο πρέπει να δοκιμαστεί σε πολλαπλά σενάρια χρήσης για να δουν αν ανταπεξέρχεται στις απαιτήσεις. Τα ψηφιακά δίδυμα είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να γίνουν οι προσομοιώσεις αφού απεικονίζουν όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος και μπορεί συνεχώς να εξελίσσεται [2]. Το τελευταίο στάδιο είναι η εικονική επαλήθευση [2]. Σε αυτό το στάδιο οι σχεδιαστές πρέπει να φτιάξουν ένα μικρό μέρος της παραγωγής για να το δοκιμάσουν και να βρουν πιθανά λάθη [2]. Αυτό μπορεί να αυξήσει το κόστος αρκετά. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να βοηθήσουν στο πρόβλημα αφού μπορούν να αξιοποιήσουν όλα τα δεδομένα και να κάνουν ρεαλιστικές προσομοιώσεις και σενάρια χρήσης [2]. Εκτός του ότι μπορούν να προβλέψουν τα λάθη, μπορούν να προτείνουν και τρόπους αντιμετώπισης των λαθών και βελτιστοποίησης του προϊόντος γρήγορα και με χαμηλό κόστος.

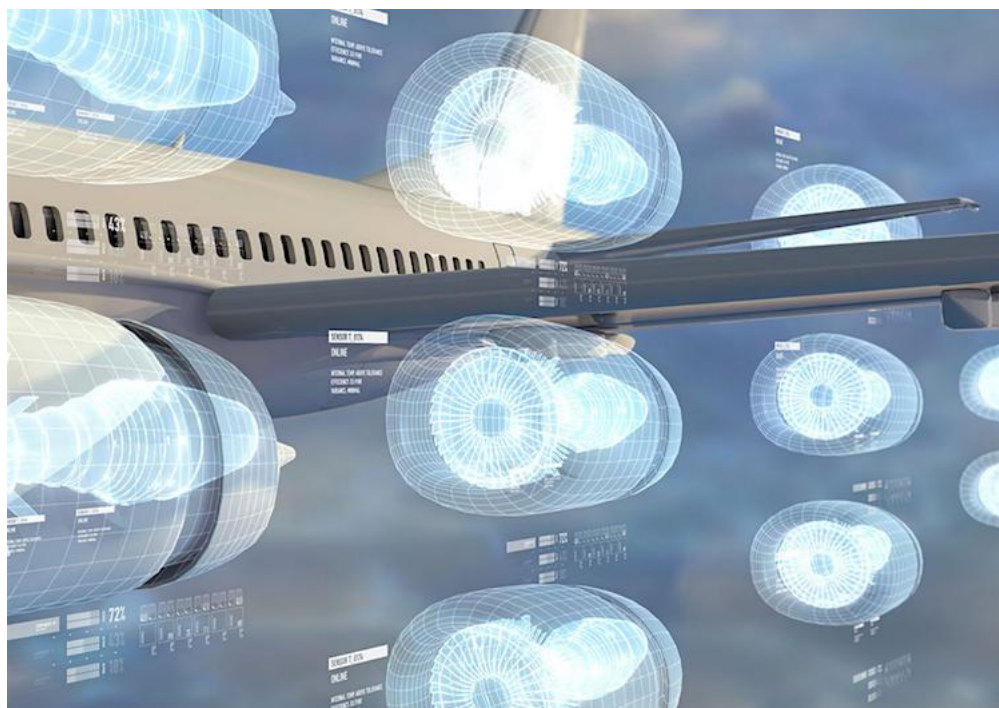
Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω θα πάρουμε σαν παράδειγμα τις διαδικασίες για την κατασκευή ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Στο κομμάτι της εννοιολογικής σχεδίασης οι σχεδιαστές μπορούν να ενσωματώσουν στο δίκτυο όλα τα φυσικά του χαρακτηριστικά, υλικά, κεραίες, εξαρτήματα και να λάβουν υπόψη τους το περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργεί. Μπορούν ακόμα να ενσωματώσουν και τα χαρακτηριστικά που αφορούν στις άυλες πτυχές του δικτύου όπως τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, την ταχύτητα διάδοσης, τον όγκο των δεδομένων που πρέπει το δίκτυο να μεταφέρει κ.α. Σε αυτό το στάδιο πολύ σημαντικό είναι να ελεγχθεί το κόστος του προϊόντος. Με βάση τα δεδομένα της αγοράς οι σχεδιαστές μπορούν να αποφασίσουν για τα υλικά, τον τρόπο παραγωγής και το τελικό κόστος.

Στο λεπτομερή σχεδιασμό οι σχεδιαστές έχοντας δημιουργήσει ένα ψηφιακό πρωτότυπο μπορούν να προσομοιώσουν διάφορα σενάρια χρήσης. Με αυτόν τον τρόπο έχουν την δυνατότητα να δουν αν το δίκτυο που σχεδίασαν μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις και να διαχειριστεί τον όγκο των δεδομένων που οι χρήστες θέλουν να μεταφέρουν, την ταχύτητα με την οποία αυτά επεξεργάζονται και μεταφέρονται, τα σφάλματα που υπάρχουν στο δίκτυο και

γενικά την απόδοση του. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της αγοράς μπορούν να πάρουν αποφάσεις που αφορούν στον σχεδιασμό του δικτύου, πρωτόκολλα επικοινωνίας και την φυσική υλοποίηση του δικτύου, κεραιές, γραμμές μεταφοράς, τα υλικά κατασκευής του και να λύσουν όλα τα σχεδιαστικά προβλήματα του δικτύου χωρίς να κατασκευάσουν μέρος του δικτύου στον πραγματικό κόσμο εξοικονομώντας έτσι χρόνο και χρήματα.

Στο τελικό στάδιο οι σχεδιαστές έχοντας καταλήξει στο τελικό προϊόν μπορούν να κάνουν ρεαλιστικές προσομοιώσεις, απεικονίζοντας ρεαλιστικά το περιβάλλον αλλά και τη χρήση του δικτύου λύνοντας έτσι όποιο πρόβλημα μπορεί να προκύψει.

Μεγάλα ερευνητικά κέντρα χρησιμοποίησαν τα ψηφιακά δίδυμα για να κάνουν προσομοιώσεις σχετικά με τις πτήσεις των αεροσκαφών [2]. Συγκέντρωσαν δεδομένα που αφορούν στις δυνάμεις που εφαρμόζονται στα αεροσκάφη κατά την πτήση τους και την αντοχή των υλικών τους. Έτσι κατάφεραν να δημιουργήσουν προσομοιώσεις που μπορούσαν να προβλέψουν τις φθορές των αεροσκαφών και να κάνουν τις απαραίτητες ενέργειες σχετικά με την συντήρησή τους (Εικόνα 1).



Εικόνα 1 Στιγμιότυπο από προσομοίωση πτήσης.

Η ίδια διαδικασία μπορεί να έχει εφαρμογή σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς [2]. Στη βιομηχανία αυτοκινήτων οι σχεδιαστές του ψηφιακού διδύμου μπορούν να ενσωματώσουν στην προσομοίωση τις πρώτες ύλες που είναι απαραίτητες, τα μηχανήματα και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται, τις προτιμήσεις του αγοραστικού κοινού.

Εξετάζοντας διάφορα σενάρια χρήσης μπορεί να απεικονιστεί όλος ο κύκλος των εργασιών που οι άνθρωποι και τα μηχανήματα της παραγωγής κάνουν για να παραχθεί το τελικό προϊόν (Εικόνα 2). Σε αυτό το στάδιο μπορούν να εξεταστούν διαφορετικοί τρόποι και μέθοδοι παραγωγής για να εξαχθούν δεδομένα σχετικά με το κόστος και την απόδοση της παράγωγης. Μπορούν να κάνουν προσομοιώσεις και να ελέγξουν ολόκληρο των κύκλο ζωής του προϊόντος και να αντιμετωπίσουν πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν στην παραγωγή. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της αγοράς μπορούν οι σχεδιαστές της παραγωγής να πάρουν αποφάσεις σχετικά με την βελτιστοποίηση της παραγωγής και το τελικό προϊόν.



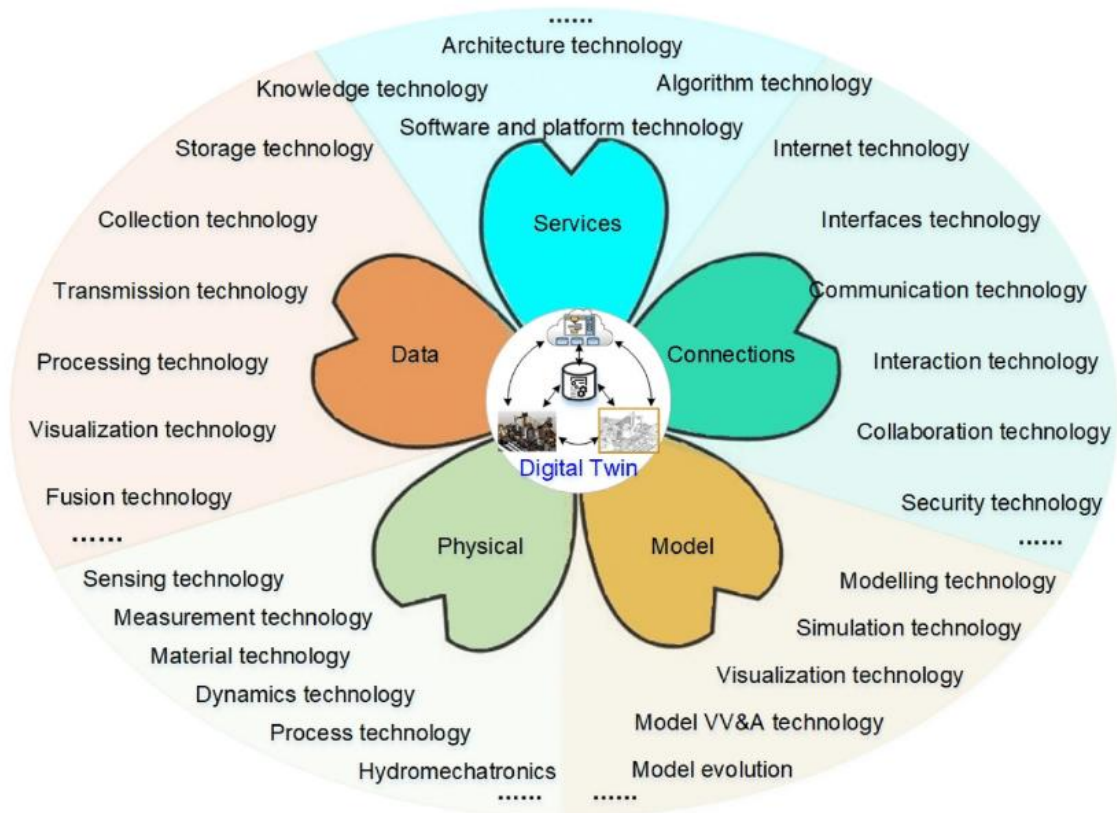
Εικόνα 2 Στιγμιότυπο από προσομοίωση για την παραγωγή οχημάτων.



## Κεφάλαιο 3 Τεχνολογίες και εργαλεία για τα Ψηφιακά Δίδυμα

Λόγω των πολλών και πολύπλοκων σχέσεων που τα ψηφιακά δίδυμα καλούνται να αναπαραστήσουν είναι απαραίτητη η χρήση διάφορων τεχνολογιών και γνώσεων. Οι τεχνολογίες και οι γνώσεις αυτές αφορούν στον ψηφιακό κόσμο και έχουν να κάνουν με την δημιουργία της προσομοίωσης, λειτουργίες, δεδομένα, αναπαράσταση. Αφορούν όμως και στον φυσικό κόσμο, πώς τον μελετάμε για να συλλέξουμε τα δεδομένα που μας αφορούν, όπως ο όγκος κίνησης, οι κανόνες οδικής κυκλοφορίας, οι επιλογές ενός οχήματος ως προς το που θα κινηθεί. Η ψηφιακή αναπαράσταση του φυσικού κόσμου πρέπει να είναι σύμφωνη με τους φυσικούς νόμους που διέπουν τα αντικείμενα που μελετούνται. Για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου απαιτούνται τεχνολογίες απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο του φυσικού κόσμου [1]. Όσο πιο ακριβής είναι η ψηφιακή απεικόνιση τόσο καλύτερη είναι και η απόδοση του διδύμου. Κατά την λειτουργία του ψηφιακού διδύμου ένας τεράστιος όγκος δεδομένων που εξάγεται από τον φυσικό κόσμο, επεξεργάζεται και χρησιμοποιείται από τον ψηφιακό κόσμο και επαναπροωθείται στον φυσικό κόσμο [1]. Είναι απαραίτητη η χρήση τεχνολογιών που αφορούν στην ανάλυση, μετάδοση, αποθήκευση επεξεργασία των δεδομένων για να μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα [1]. Για να λειτουργήσουν όλες οι υπηρεσίες απαιτούνται εφαρμογές λογισμικού που εκμεταλλεύονται τις αντίστοιχες αρχιτεκτονικές υπολογιστών και μικροϋπολογιστών, και γνώσεις σχετικά με την παροχή υπηρεσιών [1]. Ενώ για τη σύνδεση μεταξύ όλων των ενοτήτων του ψηφιακού διδύμου είναι απαραίτητες οι τεχνολογίες δικτύων και του διαδικτύου, ασφάλειας δικτύων, πρωτοκόλλων επικοινωνίας κ.α. (Εικόνα 3)

Για να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό δίδυμο πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά εργαλεία, εργαλεία που αφορούν στον έλεγχο του φυσικού κόσμου, στον ψηφιακό, στην διαχείριση δεδομένων, στις υπηρεσίες και στις συνδέσεις.



Εικόνα 3 Τεχνολογίες για την κατασκευή Ψηφιακών Διδύμων [1]

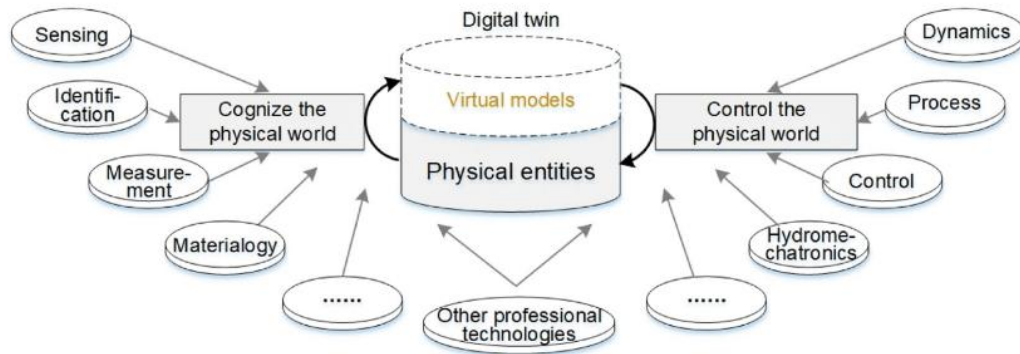
### 3.1 Σύλληψη και έλεγχος φυσικού κόσμου

Στον πραγματικό κόσμο υπάρχουν πολλές σχέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων και το ψηφιακό μοντέλο καλείται να αναπαραστήσει όχι μόνο τις οντότητες αλλά και τις μεταξύ τους σχέσεις [1]. Μια τέτοια διαδικασία είναι πολύ περίπλοκη και αρκετά δύσκολη. Η αναπαράσταση του φυσικού κόσμου στον ψηφιακό δεν είναι εξ' αρχής πλήρης καθώς δεν εισάγεται το σύνολο των φυσικών νόμων για κάθε οντότητα ούτε και το σύνολο των υπαρχόντων σχέσεων μεταξύ των οντοτήτων [1]. Όσο όμως βελτιώνεται μπορούμε να δούμε και να κατανοήσουμε καλύτερα τον φυσικό κόσμο. Για την δημιουργία ψηφιακών διδύμων υψηλής πιστότητας απαραίτητα είναι και τα κατάλληλα δεδομένα που θα επιτρέψουν την ακριβή

αναπαράσταση των οντοτήτων [1]. Αρχικά πρέπει να συγκεντρωθούν δεδομένα που αφορούν στο μέγεθος, στο σχήμα, στην αντοχή των υλικών και των οντοτήτων.

Για τη συλλογή των χαρακτηριστικών του φυσικού κόσμου είναι απαραίτητες διάφορες τεχνολογίες όπως οι κάμερες, το IoT, οι αισθητήρες [1]. Επίσης για την σύνδεση του ψηφιακού μοντέλου με τον φυσικό κόσμο σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη η χρήση τεχνολογιών δικτύων, υπολογιστική νέφους, και βάσεων δεδομένων [1]. Η εκτέλεση μιας ενέργειας από μία οντότητα είναι πιθανό να επιφέρει αλλαγή σε μία δεύτερη οντότητα, και ως εκ τούτου οι τεχνολογίες μεταφοράς ενέργειας, σχεδιασμού και έλεγχου των οντοτήτων είναι απαραίτητες. Όσο τα ψηφιακά δίδυμα εξελίσσονται τόσο περισσότερες λειτουργίες του πραγματικού κόσμου μπορούν να ενσωματώσουν [1]. Η μελέτη αυτών των λειτουργιών παράγει μεγάλους όγκους δεδομένων για την επεξεργασία και ανάλυση των οποίων είναι απαραίτητη η τεχνολογία του Big Data [1]. (Εικόνα 4 Εικόνα 4)

Όσο αφορά στον φυσικό κόσμο υπάρχουν δύο κατηγορίες εργαλείων: εργαλεία για τον έλεγχο και εργαλεία για την αναγνώριση του φυσικού κόσμου [1]. Η αναγνώριση του φυσικού κόσμου είναι το πιο απαραίτητο βήμα για την δημιουργία καλών ψηφιακών διδύμων [1]. Όταν οι φυσικές οντότητες συνδέονται με συστήματα συλλογής και διαχείρισης δεδομένων τότε μπορούμε να έχουμε ρεαλιστικά μοντέλα που μπορούν να έχουν πρακτικές εφαρμογές [1]. Εργαλεία όπως το ali cloud IoT παρέχουν ασφαλή και σταθερή σύνδεση σε πολλές πλατφόρμες με διαφορετικά πρωτόκολλα σε διαφορετικές περιοχές [1]. Τα ψηφιακά δίδυμα τρέχουν παράλληλα με τον πραγματικό κόσμο έτσι είναι απαραίτητο τα δεδομένα που συλλέγονται από τον φυσικό κόσμο να ελέγχονται με τα δεδομένα που συλλέγονται από το ψηφιακό δίδυμο για να φαίνονται τυχόν αποκλίσεις ή λάθη [1]. Το μεγαλύτερο μέρος των εργαλείων που χρησιμοποιούμε βασίζονται στην εικόνα, εργαλεία όπως αισθητήρες, laser για την μέτρηση αποστάσεων κ.α. Τα εργαλεία που αφορούν στον έλεγχο του φυσικού κόσμου μπορούν να βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση των φυσικών οντοτήτων [1]. Προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με το πως λειτουργούν και πως μπορούν να αναπαρασταθούν στον ψηφιακό κόσμο πιο αποδοτικά και με περισσότερη ασφάλεια [1].



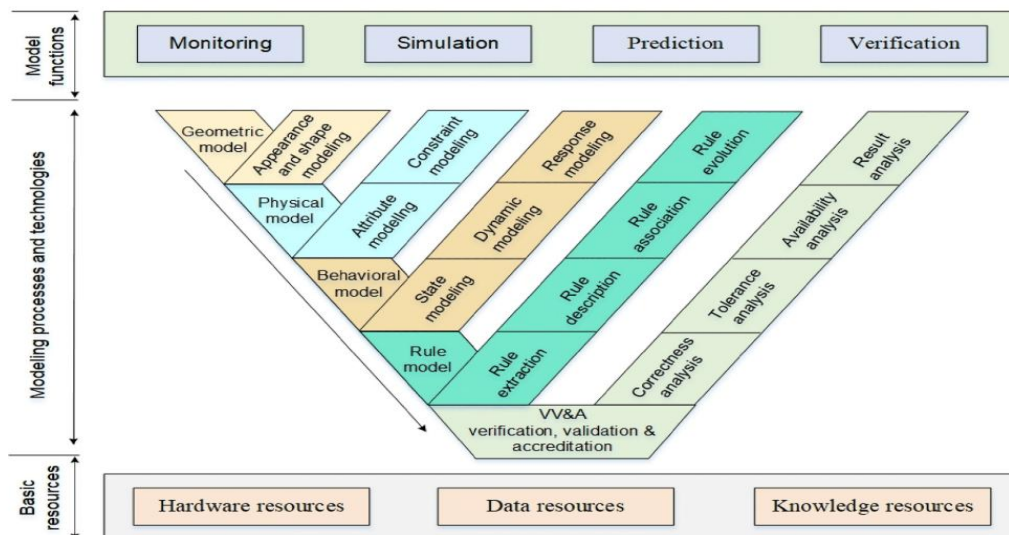
Εικόνα 4 Τεχνολογίες για την κατανόηση και τον έλεγχο του φυσικού κόσμου [1]

### 3.2 Δημιουργία μοντέλων για τα ψηφιακά δίδυμα

Η διαδικασία δημιουργίας των ψηφιακών μοντέλων είναι η διαδικασία αναπαράστασης των φυσικών οντοτήτων στον ψηφιακό κόσμο με τρόπο τέτοιο ώστε να μπορέσει ο υπολογιστής να τις κατανοήσει και να τις επεξεργαστεί [1]. Είναι το πιο σημαντικό στοιχείο στην δημιουργία ψηφιακών δίδυμων γιατί περιέχει και αναπαριστά όλες τις πληροφορίες του φυσικού κόσμου [1]. Υπάρχουν τέσσερις κύριες υποκατηγορίες μοντέλων όπως το γεωμετρικό μοντέλο, το φυσικό μοντέλο, το μοντέλο συμπεριφορών και το μοντέλο κανόνων [1]. Το γεωμετρικό μοντέλο περιγράφει το σχήμα την εμφάνιση και τα συστατικά της φυσικής οντότητας με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί ο υπολογιστής να επεξεργαστεί τα δεδομένα [1]. Το φυσικό μοντέλο περιγράφει τις φυσικές πληροφορίες που το γεωμετρικό δεν μπορεί, δηλαδή τις λειτουργίες και τα όρια των φυσικών οντοτήτων όπως την ανθεκτικότητα, τη σκληρότητα του εδάφους, την θερμότητα κ.α. [1]. Το μοντέλο συμπεριφορών περιγράφει τις λειτουργίες της οντότητας, τον τρόπο που αντιδρά σε αλλαγές, τον τρόπο που αλληλεπιδρά με άλλες οντότητες, τον τρόπο που αντιδρά σε εσωτερικές αλλαγές [1]. Το μοντέλο κανόνων περιέχει όλους τους κανόνες που υπάρχουν στον φυσικό κόσμο, περιέχει όχι μόνο τους φυσικούς νόμους αλλά και τους κανόνες με βάση τους οποίους λειτουργούν οι κοινωνίες [1]. Δίνει έτσι την δυνατότητα στο ψηφιακό δίδυμο να έχει λογική να κρίνει και να βελτιστοποιείται [1]. Το δίδυμο μέσα από την εφαρμογή των κανόνων μπορεί να εξελίσσεται και να προβλέπει τις εξελίξεις [1]. Με βάση αυτήν την εξέλιξη μπορεί να επανεξετάζει τους κανόνες και να τους βάζει ξανά σε λειτουργία [1]. Σήμερα τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί είναι κυρίως το γεωμετρικό και το φυσικό [1]. Υπάρχει δηλαδή έλλειψη όσο αφορά στα άλλα μοντέλα για αυτό το λόγο τα σημερινά ψηφιακά δίδυμα δεν μπορούν να

περιγράψουν ρεαλιστικά τον φυσικό κόσμο [1]. Πρέπει λοιπόν να δοθεί έμφαση στα άλλα δυο μοντέλα για να έχουμε πιο ολοκληρωμένα και αποδοτικά ψηφιακά δίδυμα. (Εικόνα 5)

Το ANSYS Twin Builder είναι ένα πολύ βασικό εργαλείο, περιέχει έτοιμες βιβλιοθήκες με χρήσιμα στοιχεία για την εφαρμογή που μπορεί ο χρήστης να ενσωματώσει στο σύστημα του και επιπλέον επιτρέπει την ενσωμάτωση εργαλείων από διαφορετικές προελεύσεις. Συνολικά επιτρέπει την γρήγορη δημιουργία μοντέλων υψηλής πιστότητας για τις φυσικές οντότητες χάρη στα έτοιμα μοντέλα που υπάρχουν στις βιβλιοθήκες και τον τρόπο που επιτρέπει στον χρήστη να συνδέσει διαφορετικά εργαλεία στο σύστημα. Ακόμα ένα χρήσιμο εργαλείο είναι και το λογισμικό Siemens NX που επιτρέπει την δημιουργία εξελιγμένων προσομοιώσεων και κατασκευαστικών λύσεων για κάθε τμήμα της δημιουργίας προϊόντων. Υπάρχουν ακόμα εργαλεία όπως το 3D Max που επιτρέπουν την δημιουργία φυσικών οντοτήτων και του περιβάλλοντος με μεγάλη λεπτομέρεια όσο αφορά το γεωμετρικό τους μοντέλο, σχήμα, εμφάνιση, μέγεθος. Εργαλεία όπως το CoDeSy επιτρέπουν την δημιουργία μοντέλου συμπεριφοράς στις οντότητες με σκοπό να αποτυπωθούν οι σχέσεις και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οντοτήτων και να έχουμε πιο αποδοτικά μοντέλα. Εργαλεία όπως το TC's Thingworx επιτρέπουν την εισαγωγή κανόνων και συμπεριφορών στα μοντέλα για την καλύτερη παρατήρηση των συμπεριφορών και λειτουργιών των μοντέλων.



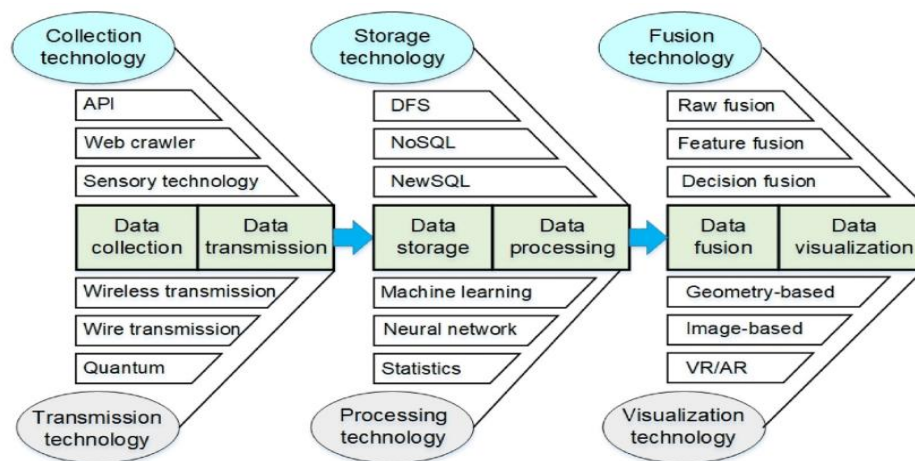
Εικόνα 5 Τεχνολογίες για την δημιουργία μοντέλων για τα ψηφιακά δίδυμα [1]

### 3.3 Διαχείριση δεδομένων στα ψηφιακά δίδυμα

Ένα ψηφιακό δίδυμο που δίνει μεγάλη βάση στα δεδομένα μπορεί να προβλέψει, να αντιδράσει και να προσαρμοστεί στις αλλαγές του περιβάλλοντος [1]. Το δίδυμο δέχεται, μεταδίδει, επεξεργάζεται, αποθηκεύει, ενώνει, και οπτικοποιεί δεδομένα [1]. Οι πηγές από τις οποίες προέρχονται όλα τα δεδομένα στο σύστημα είναι τα φυσικά στοιχεία του συστήματος, το λογισμικό και το διαδίκτυο [1]. Τα φυσικά στοιχεία του συστήματος αφορούν κάμερες, αισθητήρες, barcodes και όποιο άλλο φυσικό στοιχείο χρησιμοποιούν για να μεταφέρουν πληροφορία. Τα δεδομένα λογισμικού αφορούν όλες τις εφαρμογές του λογισμικού για να επεξεργάζεται τα δεδομένα που μαζεύονται από τα φυσικά στοιχεία [1]. Η μετάδοση των δεδομένων αφορά στις ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες για την μετάδοση δεδομένων όπως καλώδια, οπτικές ίνες, Bluetooth, Wi-Fi και όποια άλλη τεχνολογία μπορεί να μεταδώσει δεδομένα [1]. Η αποθήκευση δεδομένων αφορά στην αποθήκευση με σκοπό την επεξεργασία, ανάλυση και διαχείριση των δεδομένων. Αυτό γίνεται με τις τεχνολογίες που αφορούν στις βάσεις δεδομένων [1]. Η επεξεργασία των δεδομένων αφορά στην εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από τα δεδομένα που δέχεται το δίδυμο [1]. Αφορά στον τρόπο που απομακρύνεται ο θόρυβος, τα ημιτελή και άχρηστα δεδομένα από τα χρήσιμα. Αφορά στις τεχνικές με τις οποίες ξεχωρίζουν τα χρήσιμα από τα άχρηστα δεδομένα και στις τεχνικές με τις οποίες τα χρήσιμα επεξεργάζονται για να βγουν συμπεράσματα [1]. Η σύνδεση δεδομένων αφορά στις τεχνικές σύνθεσης, φιλτραρίσματος, συσχέτισης και ενσωμάτωσης των δεδομένων που φτάνουν στο σύστημα με διαφορετικές μορφές και είναι αναγκαία για την λειτουργία του [1]. Η οπτικοποίηση αφορά στις τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων και των συμπερασμάτων σε κατανοητή μορφή για τον χρήστη όπως γραφήματα και ιστογράμματα [1].

Όσο τα ψηφιακά δίδυμα επεκτείνονται τόσο μεγαλώνει και ο όγκος των δεδομένων που πρέπει να επεξεργαστούν. Για την συλλογή πληροφοριών πρέπει να εστιάσουμε στις τεχνολογίες που επιτρέπουν την συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Για την μεταφορά τους πρέπει να εστιάσουμε σε τεχνολογίες που επιτρέπουν την γρήγορη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων. Για την αποθήκευσή τους είναι απαραίτητη η χρήση νέων μέσων και αρχιτεκτονικών αποθήκευσης. Υπάρχουν ακόμα κενά στα πεδία που αναφέρθηκαν και αρκετή πρόοδος να γίνει. (Εικόνα 6 Εικόνα 6)

Τα δεδομένα περιέχουν πληροφορίες που είναι βασικές για τα ψηφιακά δίδυμα. Τα εργαλεία που σχετίζονται με τα δεδομένα αφορούν στην συλλογή, μετάδοση, αποθήκευση, επεξεργασία, σύνδεση και απεικόνιση των δεδομένων και της πληροφορίας. Για την συλλογή κυρίως χρησιμοποιούνται δίκτυα αισθητήρων για την μετάδοση πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο όπως DHDAS. Για την μετάδοση χρησιμοποιούνται εργαλεία που αφορούν στην μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και βεβαιώνουν ότι τα δεδομένα δεν χάνονται στην διαδρομή. Τέτοια εργαλεία είναι τα παραδοσιακά FTP αλλά και το Aspera. Για την αποθήκευση δεδομένων χρειάζονται εργαλεία που επιτρέπουν την κατηγοριοποίηση και αποθήκευση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο όπως το HBase. Για την επεξεργασία χρειαζόμαστε εργαλεία που επιτρέπουν την απομάκρυνση θορύβων και άχρηστων δεδομένων και κρατάνε τα χρήσιμα. Ένα τέτοιο εργαλείο είναι το Spark. Η σύνδεση δεδομένων αναφέρεται στο φιλτράρισμα, στην συσχέτιση και στην σύνδεση των διαφορετικών δεδομένων για τον καλύτερο έλεγχο, επαλήθευση και διάγνωση των δεδομένων. Τέτοια εργαλεία είναι τα Pycharm και Spyder. Τέλος η απεικόνιση των δεδομένων αφορά στην καταγραφή και εμφάνιση των δεδομένων με κατανοητό τρόπο και ένα τέτοιο εργαλείο είναι και το Echart.



Εικόνα 6 Τεχνολογίες για την διαχείριση δεδομένων στα ψηφιακά δίδυμα [1]

### 3.4 Υπηρεσίες ψηφιακών διδύμων

Τα ψηφιακά δίδυμα εμπεριέχουν τεχνολογίες που αφορούν στην παρακολούθηση, στην προσομοίωση, στην διάγνωση και πρόγνωση του φυσικού κόσμου [1]. Για την παρακολούθηση

είναι απαραίτητες τεχνολογίες που αφορούν στην επεξεργασία εικόνας, στα γραφικά κ.α. [1]. Η προσομοίωση αφορά στην προσομοίωση όλων των στοιχείων του συστήματος που μελετάται και έχει να κάνει με τεχνολογίες που αφορούν στην μηχανική, στα ηλεκτρικά κυκλώματα κ.α. [1]. Η διάγνωση και πρόγνωση αφορά στην επεξεργασία των δεδομένων και χρησιμοποιεί τεχνολογίες που αφορούν στην στατιστική, στην μηχανική μάθηση κ.α. [1].

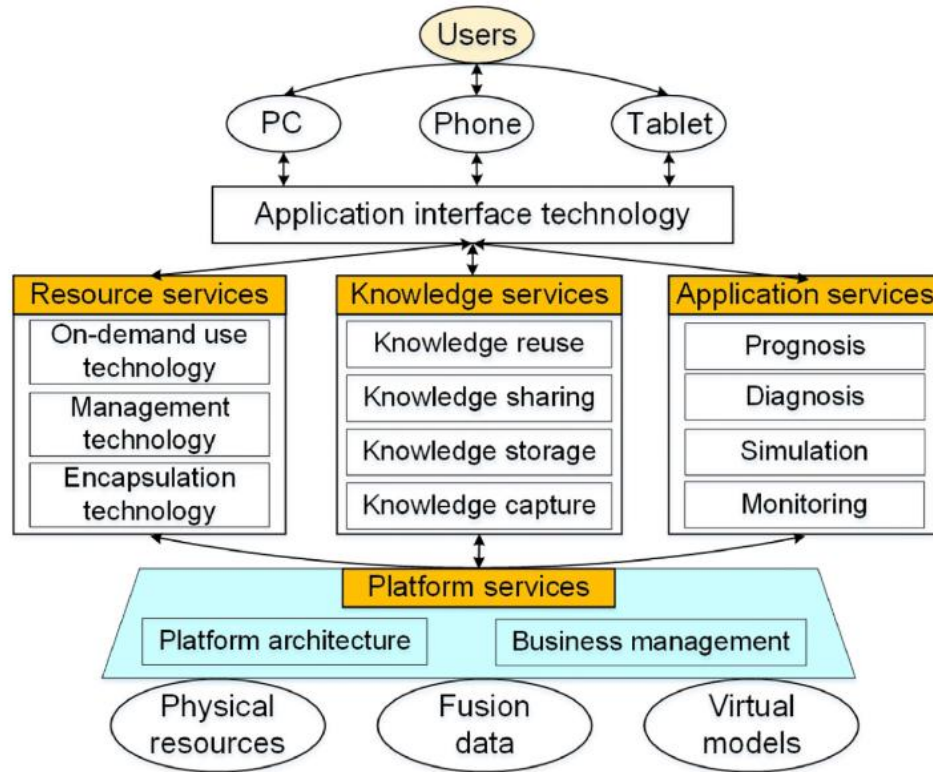
Οι υπηρεσίες που παρέχονται μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες ,την δημιουργία, την διαχείριση και τις ξεχωριστές απαιτήσεις του κάθε χρήστη. Η δημιουργία υπηρεσιών αφορά στους τρόπους που οι πόροι του συστήματος επεξεργάζονται και απεικονίζονται τα αποτελέσματα [1]. Η διαχείριση λειτουργιών αφορά στις απαιτήσεις των χρηστών και στην αξιολόγηση των αναγκών, ενώ οι ξεχωριστές απαιτήσεις αφορούν στην ενσωμάτωση των ψηφιακών διδύμων στις ξεχωριστές απαιτήσεις κάθε χρήστη [1].

Συνολικά η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου είναι μια δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία. Είναι δύσκολο για χρήστες που δεν έχουν σχετική γνώση να φτιάξουν και να χρησιμοποιήσουν τα ψηφιακά μοντέλα. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη να φτιαχτούν εύχρηστα μοντέλα που είναι εύκολο να μεταφερθούν μεταξύ των χρηστών. Στο μέλλον τεχνολογίες που αφορούν στην κίνηση και στην καταγραφή συμπεριφορών θα παίξουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία των ψηφιακών μοντέλων. Ακόμα επειδή τα ψηφιακά δίδυμα είναι μεγάλα και σύνθετα συστήματα θα πρέπει να δοθεί έμφαση στους διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης και στην ανάγκη για γρήγορα και αποδοτικά υπολογιστικά συστήματα. Οι διαφορετικές υπηρεσίες και οι διαφορετικές ανάγκες κάθε χρήστη θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό των μοντέλων αυτών. (Εικόνα 7 Εικόνα 7)

Τα εργαλεία που αφορούν στις υπηρεσίες των ψηφιακών διδύμων μπορούν να χωριστούν στις κατηγορίες που αναφέρονται στις πλατφόρμες, στις προσομοιώσεις, στην βελτιστοποίηση, στον διαγνωστικό και προγνωστικό έλεγχο των υπηρεσιών. Οι πλατφόρμες περιέχουν καινούργιες τεχνολογίες όπως internet of things, τεχνητή νοημοσύνη, και big data. Εργαλεία που σχετίζονται με αυτές τις τεχνολογίες είναι τα Thingworx, HIROTEC και MindSphere. Για την παρακολούθηση, την βελτιστοποίηση, τον διαγνωστικό και προγνωστικό έλεγχο των υπηρεσιών χρησιμοποιούνται εργαλεία όπως η πλατφόρμα προσομοίωσης του ANSYS και το MATLAB. Τα εργαλεία βελτιστοποίησης ενεργοποιούνται και τρέχουν χιλιάδες σενάρια και προσομοιώσεις για



να γίνει προγνωστικός έλεγχος της ετοιμότητας του συστήματος. Ένα τέτοιο εργαλείο είναι και το Plant Simulation.



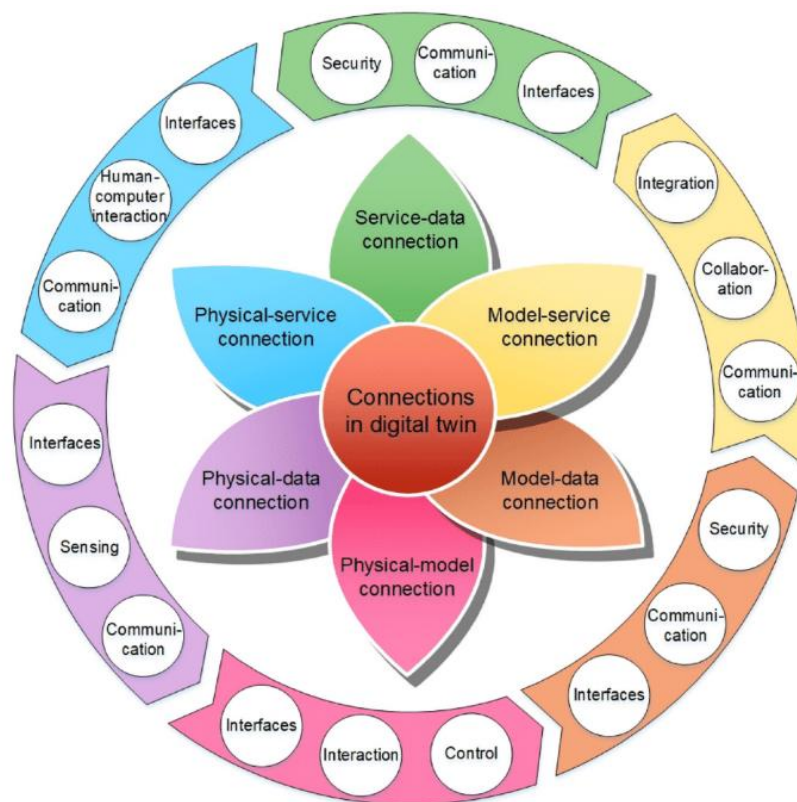
Εικόνα 7 Τεχνολογίες για τις υπηρεσίες ψηφιακών διδύμων [Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.1]

### 3.5 Συνδέσεις στα ψηφιακά δίδυμα

Εξαιτίας της μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο οι καταστάσεις των φυσικών οντοτήτων αναπαριστούνται δυναμικά στον ψηφιακό κόσμο και η ανάλυση των αποτελεσμάτων των ψηφιακών μοντέλων χρησιμοποιείται για να ελεγχθούν οι φυσικές οντότητες [1]. Το ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιείται για τη διαχείριση ολόκληρου του κύκλου ζωής του προϊόντος, ο οποίος θέτει τα θεμέλια για την χρήση των δεδομένων που αφορούν την ανάλυση, την πρόβλεψη, την ανίχνευση της ποιότητας και το προϊόν σχεδιασμό του προϊόντος [1]. Με τις φυσικές υπηρεσίες συνδέονται οι φυσικές οντότητες για να λαμβάνουν κρίσιμα δεδομένα και για να επιστρέφουν αποτελέσματα [1]. Επειδή ο άνθρωπος αλληλεπιδρά με το σύστημα τόσο με φυσικό όσο και με ψηφιακό τρόπο, θα έπρεπε στο σύστημα να ενσωματωθούν τεχνολογίες που αφορούν

στην αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπου και υπολογιστή. Συνολικά για τα διαφορετικά μοντέλα χρειάζονται δίαυλοι επικοινωνίας, πρωτόκολλα αλληλεπίδρασης, και τεχνολογίες που διασφαλίζουν την ομαλή αλληλεπίδραση δεδομένων μεταξύ φυσικού και πραγματικού κόσμου [1]. Ενώ τέλος θα πρέπει να ενσωματωθούν και τεχνολογίες σχετικά με την ασφάλεια των ψηφιακών διδύμων [1]. (Εικόνα 8Εικόνα 8)

Τα εργαλεία συνδέσεων στα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν τον φυσικό με τα ψηφιακό κόσμο αλλά και τα διαφορετικά μέρη του ψηφιακού διδύμου μεταξύ τους. Ο ρόλος κάθε ψηφιακού διδύμου είναι να καταγράψει τον ψηφιακό και τον φυσικό κόσμο και να τους ενώσει. Το MindSphere το Thingworx και μερικά άλλα είναι εργαλεία που πραγματοποιούν αυτές τις συνδέσεις και ενώνουν τους δύο κόσμους. Οι συνδέσεις μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων των ψηφιακών διδύμων είναι απαραίτητες για την καλύτερη λειτουργία τους, την διάγνωση και αντιμετώπιση προβλημάτων, την βελτιστοποίηση της απόδοσης και την συντήρηση του συστήματος.



Εικόνα 8 Τεχνολογίες για τις συνδέσεις στα ψηφιακά δίδυμα [1]

## Κεφάλαιο 4 Σχεδιασμός και υλοποίηση του διδύμου

### 4.1 Περιγραφή του διδύμου

Το ψηφιακό δίδυμο που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής είναι ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να αναπαραστήσει το οδικό δίκτυο και την κίνηση των οχημάτων σε αυτό. Αρχικά στο ψηφιακό δίδυμο που κατασκευάστηκε επιλέχθηκε ένα κομμάτι του οδικού άξονα της πόλης του Βόλου. Το κομμάτι αυτό του οδικού δικτύου αναπαριστάται στην Unity 3D χρησιμοποιώντας τα βασικά αντικείμενα που το σύστημα της Unity 3D προσφέρει, όπως κύβους, επίπεδα κ.α.

Όταν ο χρήστης ξεκινήσει την προσομοίωση δημιουργείται ένας αρχικός όγκος κίνησης και τα οχήματα ξεκινούν να διασχίζουν τους δρόμους ακολουθώντας τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας.

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσθέσει ή να αφαιρέσει οχήματα στα κομμάτια δρόμων που τον ενδιαφέρουν μέσα από την προσομοίωση.

Σε κάποιες διασταυρώσεις των δρόμων υπάρχουν φανάρια για να ρυθμίσουν την κυκλοφορία. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τα δεδομένα που σχετίζονται με τα φανάρια δηλαδή το χρόνο που ένα φανάρι είναι πράσινο ή κόκκινο, μέσα από την προσομοίωση.

Στις διασταυρώσεις των δρόμων υπάρχουν οι πιθανότητες που αφορούν στην κατεύθυνση που θα ακολουθήσει ένα όχημα, αν δηλαδή θα συνεχίσει να κινείται στον δρόμο που βρίσκεται ή θα στρίψει σε κάποιον άλλο.

Τα στοιχεία που αφορούν τον όγκο κίνησης, τον χρόνο των φαναριών και τις πιθανότητες που αφορούν την κατεύθυνση των οχημάτων αποθηκεύονται στην βάση δεδομένων που είναι συνδεδεμένη με την προσομοίωση. Η βάση δεδομένων επικοινωνεί με την προσομοίωση κάθε πέντε δευτερόλεπτα για να εισάγει τα δεδομένα αυτά στο σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο κάθε αλλαγή που παρατηρείται στον φυσικό κόσμο και καταγράφεται στην βάση περνάει στον ψηφιακό και αναπαριστάται στην προσομοίωση.

Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να σταματήσει την ενημέρωση, των στοιχείων που αναφέρθηκαν, από την βάση δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποκόψει το σύστημα από τον φυσικό κόσμο και να κάνει τα πειράματα που θέλει χωρίς αυτά να επηρεάζουν τα δεδομένα του φυσικού κόσμου. Όταν ο χρήστης φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα έχει την δυνατότητα να αποθηκεύσει τις αλλαγές που έκανε στους χρόνους των φαναριών στη βάση δεδομένων.

Σε κάθε προσομοίωση ο χρήστης έχει μια ρεαλιστική εικόνα τις κίνησης και βλέπει τα προβληματικά σημεία που υπάρχουν. Οι επιλογές που δίνονται στο χρήστη είναι αρκετές ώστε να μπορέσει μέσα από διαφορετικές αλλαγές να καταφέρει την εξομάλυνση των προβληματικών σημείων.

Στα πλαίσια της εργασίας δεν υλοποιήθηκε ένα σύστημα που μπορεί να συλλέξει αυτά τα δεδομένα για να τα εισάγει αυτόματα στο σύστημα, δημιουργήθηκαν όμως οι βάσεις για να συνδεθεί με ένα τέτοιο σύστημα που μπορεί να υπάρχει ήδη ή να δημιουργηθεί στο μέλλον. Ο χρήστης μπορεί να κάνει τις απαραίτητες προσομοιώσεις σχετικά με την κίνηση και να μπορέσει έτσι να αντιληφθεί καλύτερα τα προβληματικά σημεία. Το ψηφιακό δίδυμο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να κάνει αλλαγές στο οδικό δίκτυο για να μπορέσει να αντιμετωπίσει τα προβληματικά σημεία. Με την βοήθεια του ψηφιακού διδύμου ο ερευνητής μπορεί να καταλήξει στις αλλαγές που πρέπει να γίνουν πιο εύκολα και αποδοτικά.

## **4.2 Ανάλυση χρηστών**

Το ψηφιακό δίδυμο είναι εργαλείο που διαφορετικοί άνθρωποι καλούνται να χρησιμοποιήσουν. Όπως προαναφέρθηκε το ψηφιακό δίδυμο αποτελεί ένα εργαλείο για την παρακολούθηση και ρύθμιση της κίνησης στους δρόμους. Μπορεί να δώσει χρήσιμα δεδομένα σχετικά με τα προβληματικά σημεία που υπάρχουν στα οδικά δίκτυα αλλά και το πώς μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Για να μπορέσει ο χρήστης να χρησιμοποιήσει το ψηφιακό δίδυμο δεν χρειάζεται να έχει εξειδικευμένες γνώσεις πάνω στην πληροφορική ή τον προγραμματισμό, χρειάζεται απλώς να έχει βασικές γνώσεις για την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Για την εγκατάσταση του προγράμματος ο χρήστης χρειάζεται να μπορεί να έχει βασικές γνώσεις για την χρήση των

Windows. Όσο αφορά στην χρήση του μενού ο χρήστης χρειάζεται βασικές γνώσεις της αγγλικής γλώσσας. Ο χρήστης θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιληφθεί τις αλλαγές που προκαλούν στην προσομοίωση οι αλλαγές που κάνει.

Πρωτεύοντες χρήστες: Όταν ένα οδικό δίκτυο επανασχεδιάζεται διαφορετικοί άνθρωποι με διαφορετικές ιδιότητες και γνωστικά αντικείμενα πρέπει να συνεργαστούν. Το ψηφιακό δίδυμο απευθύνεται σε ειδικούς που σχεδιάζουν οδικά δίκτυα, χωροτάκτες, μηχανικούς, και τους βοηθάει να πάρουν σωστές αποφάσεις για το έργο που θα υλοποιήσουν. Αυτή η ομάδα χρηστών έχει υψηλό μορφωτικό επίπεδο. Οι ηλικίες των μελών της ομάδας καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα. Σ' αυτή την ηλικιακή ομάδα ανήκουν όλοι οι ενεργοί εργαζόμενοι του κλάδου, αλλά όλα τα μέλη της έχουν αρκετή εμπειρία στην χρήση προγραμμάτων. Λόγω των πολλών σχεδιαστικών προγραμμάτων και εργαλείων που χρησιμοποιούν καθημερινά για την εργασία τους μπορούν εύκολα να εξερευνήσουν τις επιλογές ενός νέου προγράμματος και να κατανοήσουν την χρήση του. Οι χρήστες αυτοί συνεχώς δοκιμάζουν νέα προγράμματα που μπορούν να βελτιώσουν την δουλειά τους, οπότε δέχονται και προσαρμόζονται εύκολα στις αλλαγές της τεχνολογίας και στα νέα προγράμματα και εργαλεία που δημιουργούνται. Σημαντικό είναι ακόμα το γεγονός ότι οι περισσότεροι χρήστες αυτής της ομάδας έχουν διδαχτεί κάποια μαθήματα προγραμματισμού σε προπτυχιακό επίπεδο έτσι έχουν μια καλή σχέση με τον κλάδο της πληροφορικής. Συνολικά αυτή η ομάδα χρηστών είναι μια έμπειρη ομάδα που μπορεί εύκολα να κατανοήσει και να μάθει να χρησιμοποιεί ένα καινούργιο πρόγραμμα.

Δευτερεύοντες χρήστες: Μια ακόμα ομάδα χρηστών είναι οι άνθρωποι που αναλαμβάνουν την εφαρμογή των αλλαγών στο οδικό δίκτυο, όπως εργολάβοι. Σε αυτή την ομάδα οι χρήστες μπορούν να έχουν μια καλή εικόνα σχετικά με το πώς θα λειτουργήσει το έργο όταν υλοποιηθεί και μπορούν να πάρουν σημαντικές αποφάσεις σχετικά με την υλοποίηση και τον σχεδιασμό του. Τα άτομα που ανήκουν σε αυτή την ομάδα έχουν συνήθως υψηλό μορφωτικό επίπεδο, πολλή εργασιακή εμπειρία και γνώσεις σε όλα τα κομμάτια της κατασκευαστικής διαδικασίας. Σαν ηλικιακή ομάδα είναι συνήθως άτομα μέσης ηλικίας οπότε δεν διδάχτηκαν στο προπτυχιακό τους επίπεδο μαθήματα σχετικά με τον προγραμματισμό και την πληροφορική. Το αντικείμενο της ενασχόλησης τους δεν απαιτεί γνώσεις πληροφορικής ή την χρήση πολλών διαφορετικών προγραμμάτων. Απαιτεί όμως την χρήση προγραμμάτων που αφορούν στην οργάνωση και διοίκηση του προσωπικού καθώς και μια βασική εξοικείωση με σχεδιαστικά προγράμματα για να

είναι σε θέση να αντιληφθούν τα αποτελέσματα που εξάγουν αυτά τα προγράμματα. Σαν ομάδα χρηστών είναι μέτριοι χρήστες, μπορούν να κατανοήσουν της λειτουργίες και την χρήση ενός προγράμματος αν τους δοθεί μια περιγραφή του.

Τριτεύοντες χρήστες: Κατά την κατασκευή ενός τέτοιου έργου ο όγκος της κίνησης στους δρόμους θα μεταφερθεί σε διαφορετικά τμήματα του οδικού δικτύου τα οποία δεν θα βρίσκονται υπό κατασκευή. Για αυτό τον λόγο δημοτικές υπηρεσίες και υπάλληλοι μπορούν να αξιοποιήσουν το δίδυμο για να πάρουν δεδομένα σχετικά με το πώς θα επηρεαστούν οι υπόλοιπες περιοχές και να δουν τυχόν αλλαγές που θα πρέπει να γίνουν. Αυτή η ομάδα χρηστών αποτελείται κυρίως από άτομα που έχουν ολοκληρώσει την δευτεροβάθμια εκπαίδευση και η σχέση τους με την τεχνολογία είναι σε αρχάριο επίπεδο. Μια αρχάρια ομάδα χρηστών απαιτεί περισσότερο χρόνο και επαναλήψεις για να εξοικειωθεί με το πρόγραμμα. Ο χειρισμός του προγράμματος για μια τέτοια ομάδα πρέπει να είναι αρκετά απλός και να επιτρέπει στους χρήστες να κάνουν δοκιμές και λάθη χωρίς αυτά να είναι μη αναστρέψιμα.

Οι χρήστες που θα χρησιμοποιήσουν το δίδυμο έχουν διαφορετικά γνωστικά αντικείμενα και δεξιότητες. Κάθε χρήστης θα πρέπει να είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει το δίδυμο εύκολα και αποδοτικά για να πάρει τα δεδομένα που χρειάζεται.

### **4.3 Ανάλυση απαιτήσεων του διδύμου**

Αρχικά ο χρήστης έρχεται σε επαφή με το αρχικό μενού. Σε αυτό ο χρήστης έχει την επιλογή να ξεκινήσει να χρησιμοποιεί το δίδυμο ή να κάνει έξοδο από αυτό. Όταν ο χρήστης επιλέξει να ξεκινήσει να χρησιμοποιεί το δίδυμο ξεκινάει η προσομοίωση. Το σύστημα επιτρέπει στον χρήστη να παρατηρεί την online τρέχουσα κατάσταση του οδικού δικτύου στον ψηφιακό κόσμο σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον επιτρέπει την δημιουργία εικονικών offline σεναρίων ώστε ο χρήστης να μπορεί να ρυθμίζει τις παραμέτρους του οδικού δικτύου χωρίς αυτές να προωθούνται άμεσα στο φυσικό δίδυμο.

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ο χρήστης βλέπει το οδικό δίκτυο και το μενού για τον χειρισμό του (Εικόνα 29). Το οδικό δίκτυο αποτελείται από κομμάτια δρόμου, ευθείες και διασταυρώσεις. Πάνω στο οδικό δίκτυο δημιουργούνται και κινούνται τα οχήματα ανάλογα με τον φόρτο κίνησης που έχει ο κάθε δρόμος στο φυσικό δίδυμο. Το ψηφιακό

είναι συνδεδεμένο με την βάση δεδομένων MongoDB, με την οποία επικοινωνεί κάθε πέντε δευτερόλεπτα και λαμβάνει δεδομένα που αλλάζουν την εξέλιξη της προσομοίωσης. Η βάση δεδομένων λαμβάνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από το φυσικό δίδυμο, όπως ο όγκος κίνησης σε κάθε οδό, ο χρόνος των φαναριών σε κάθε διασταύρωση και οι πιθανότητες πορείας πάνω σε κάθε διασταύρωση που θα ακολουθήσει ένα όχημα. Ο χρήστης παρακολουθεί την προσομοίωση και μπορεί να παρέμβει σ' αυτή μέσα από τις επιλογές που υπάρχουν στο μενού. Οι ενέργειες που μπορεί να κάνει είναι να αλλάξει τον όγκο κίνησης, τον χρόνο των φαναριών, να σταματήσει ή να ξεκινήσει την ενημέρωση των δεδομένων από την βάση δεδομένων και να αποθηκεύσει τις αλλαγές που σχετίζονται με τον χρόνο των φαναριών στην βάση δεδομένων.

Τα κομμάτια δρόμου που είναι ευθείες έχουν ένα προκαθορισμένο όγκο στην αρχή της προσομοίωσης. Ο χρήστης για να αλλάξει τον όγκο της κίνησης επιλέγει το αναπτυσσόμενο μενού που αφορά στους δρόμους. Στην συνέχεια επιλέγει την οδό που τον ενδιαφέρει και ορίζει τον φόρτο των οχημάτων που θέλει να δημιουργηθούν. Το σύστημα δίνει οπτική έμφαση στην επιλεγμένη οδό για να μπορεί ο χρήστης να καταλάβει καλύτερα που βρίσκεται. Μόλις ο χρήστης πατήσει το κουμπί για την αποθήκευση ο όγκος που επέλεξε εμφανίζεται στο επιλεγμένο κομμάτι δρόμου.

Οι διασταυρώσεις έχουν πάνω τους τα φανάρια που ελέγχουν την κυκλοφορία και δεν σχετίζονται με όγκο κίνησης. Ο χρόνος λειτουργίας των φαναριών λαμβάνεται από τη βάση δεδομένων, όμως ο χρήστης μπορεί να τον αλλάξει, από το αναπτυσσόμενο μενού που αφορά στις διασταυρώσεις.

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης το σύστημα επικοινωνεί online με την βάση δεδομένων για να παίρνει δεδομένα που αφορούν στον όγκο κίνησης, στους χρόνους των φαναριών και στις πιθανότητες πορείας των οχημάτων στις διασταυρώσεις. Όταν ο χρήστης κάνει μια αλλαγή στις ρυθμίσεις αυτές, η επικοινωνία με την βάση σταματάει και το σύστημα μπαίνει σε κατάσταση offline. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αποθηκεύσει στην βάση δεδομένων τις αλλαγές στις ρυθμίσεις για τον χρόνο των φαναριών και να μεταφέρει το σύστημα και πάλι σε κατάσταση online.

Η επικοινωνία με την βάση δεδομένων μπορεί να ενεργοποιηθεί με το αντίστοιχο radio button. Στην περίπτωση που ο χρήστης δεν επιθυμεί να αποθηκεύσει τις αλλαγές που έκανε

μπορεί απλά να ενεργοποιήσει την επικοινωνία με τη βάση χωρίς να αποθηκεύσει της αλλαγές. Σε αυτή την περίπτωση, το ψηφιακό δίδυμο θα συνδεθεί και πάλι με την βάση δεδομένων και θα μεταφέρει όσα δεδομένα υπάρχουν εκεί στην προσομοίωση παραβλέποντας έτσι όποια αλλαγή έγινε. Ο χρήστης δεν έχει πρόσβαση στην βάση δεδομένων που συνδέεται με την προσομοίωση και δεν μπορεί να κάνει αλλαγές απευθείας από εκεί.

#### 4.4 Σχεδιασμός συστήματος

Για την δημιουργία και ολοκλήρωση του διδύμου υπάρχουν τέσσερις σημαντικές κατηγορίες μοντέλων που πρέπει πρώτα να δημιουργηθούν, το γεωμετρικό μοντέλο, το φυσικό μοντέλο, το μοντέλο κανόνων και το μοντέλο συμπεριφορών. Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός του τμήματος του οδικού δικτύου που μας ενδιαφέρει, το μέγεθος των δρόμων οι διασταυρώσεις και οι ευθείες. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ένα τμήμα του κεντρικού άξονα της πόλης του Βόλου. Μελετώντας δορυφορικές εικόνες επιλέχθηκαν οι δρόμοι που μας ενδιαφέρουν. Το μέγεθος και το σχήμα των οχημάτων που επιλέχθηκαν ανήκουν επίσης στο γεωμετρικό μοντέλο καθώς και το μέγεθος, τα σχήματα και τα χρώματα των φαναριών.

Το φυσικό μοντέλο περιέχει τις πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων, την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση των οχημάτων.

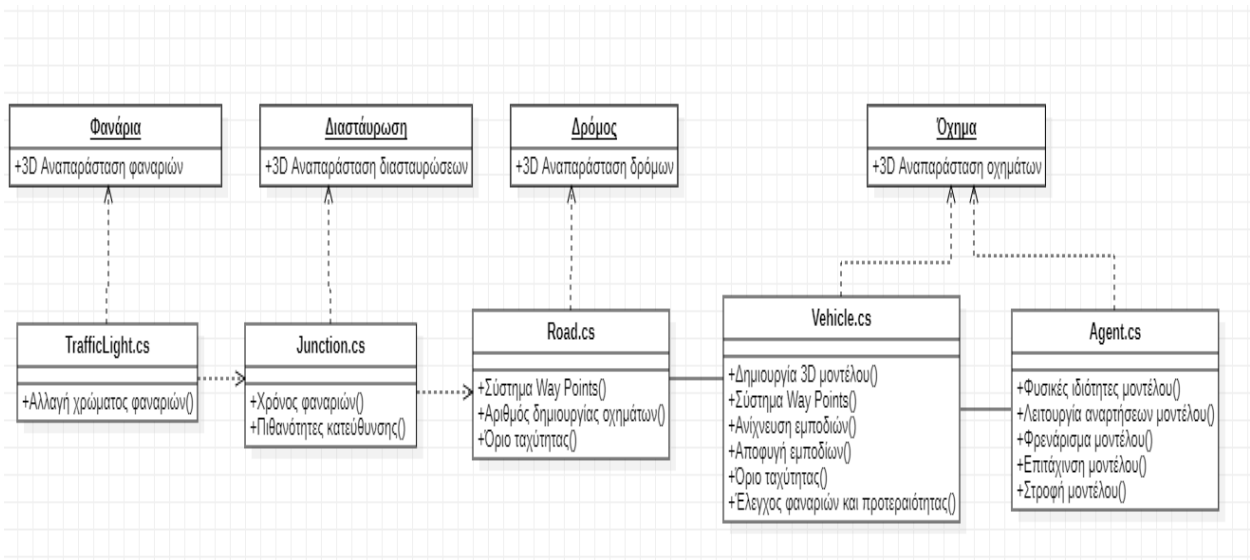
Το μοντέλο κανόνων αφορά στις πληροφορίες σχετικά με τον κώδικα οδικής κυκλοφορίας, όπως φανάρια, σήματα, όρια ταχύτητας, περιλαμβάνει δηλαδή το σύνολο των κανόνων που υπάρχουν στο σύστημα.

Το μοντέλο συμπεριφορών έχει να κάνει με τον τρόπο που λειτουργεί κάθε οντότητα στα πλαίσια του συστήματος και των κανόνων που υπάρχουν. Το αν ένα όχημα επιταχύνει όταν βρει κενό μπροστά, ή μειώσει την ταχύτητα του βλέποντας μπροστά του μπουτιλιάρισμα έχει να κάνει με την συμπεριφορά του οδηγού. Οι συμπεριφορές αυτές ποικίλουν από άνθρωπο σε άνθρωπο για αυτό το λόγο επιλέχθηκε ένα μοντέλο συμπεριφορών που να μπορεί να καλύψει την συμπεριφορά του μέσου οδηγού.

Τα μοντέλα αυτά επικοινωνούν μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Το γεωμετρικό μοντέλο αναπαριστάται με την χρήση των 3D αντικειμένων στην Unity

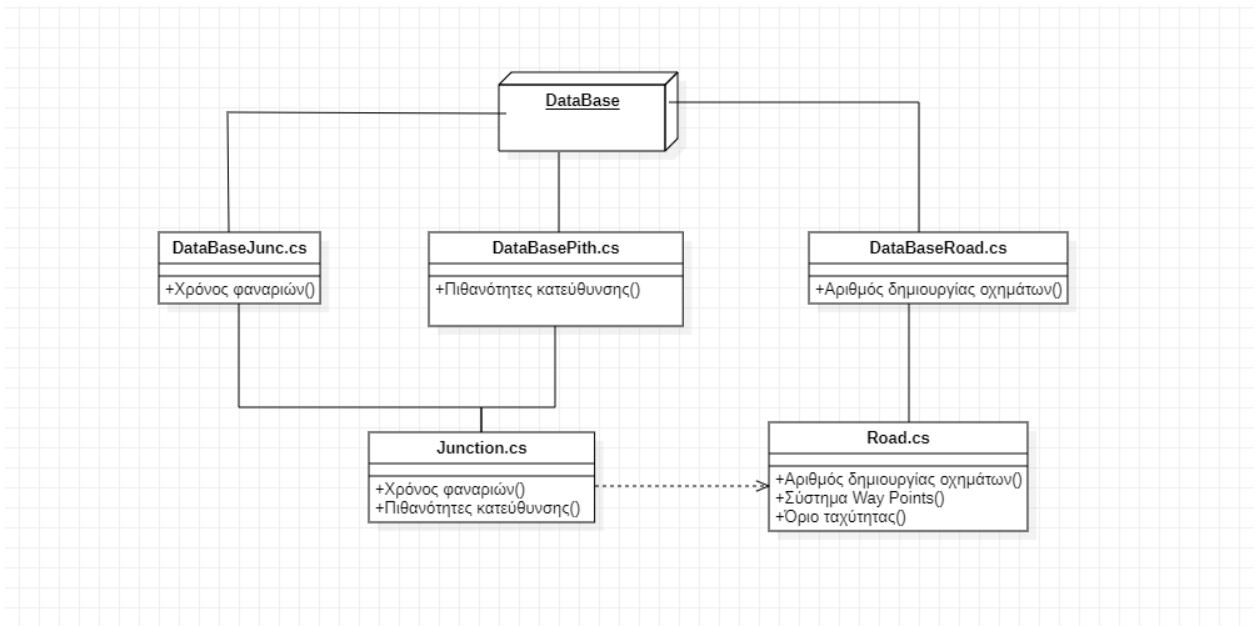


3D. Το φυσικό μοντέλο, το μοντέλο κανόνων και συμπεριφορών συνεργάζονται μεταξύ τους και συνδέονται με τα 3D αντικείμενα για να ορίσουν και να ελέγξουν της λειτουργίες των μοντέλων μέσω των σεναρίων κώδικα στην C#. Κάθε 3D αντικείμενο συνδέεται με τουλάχιστον ένα σενάριο κώδικα, το σενάριο κώδικα ορίζει και ελέγχει τις λειτουργίες του αντικείμενου. Τα σεναρία κώδικα συνδέονται μεταξύ τους για να ανταλλάξουν πληροφορίες και να συνδέσουν τις λειτουργίες των αντικειμένων, επιτρέποντας έτσι στα 3D αντικείμενα να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και να δημιουργήσουν ένα ενιαίο σύστημα (Εικόνα 9 Εικόνα 9).



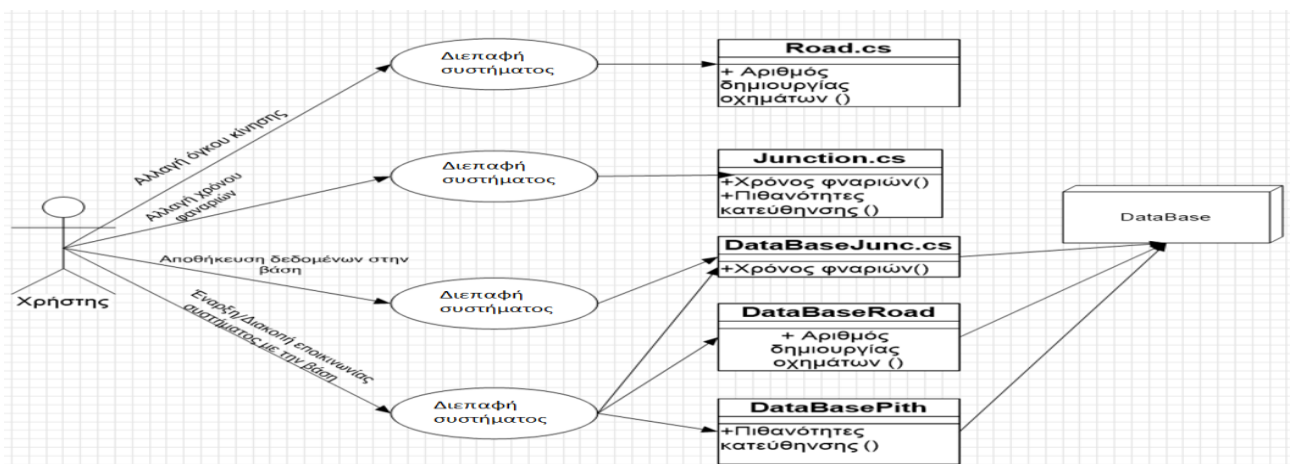
**Εικόνα 9 Συνδέσεις μοντέλων και σεναρίων κώδικα**

Για την ενημέρωση του συστήματος δημιουργήθηκε η βάση δεδομένων που συνδέεται με το σύστημα για να εισάγει δεδομένα που αφορούν στο σύστημα όπως ο όγκος κίνησης, ο χρόνος των φαναριών και οι πιθανότητες που αφορούν στην κατεύθυνση των οχημάτων. Η βάση δεδομένων συνδέεται με τα σεναρία κώδικα που αποθηκεύουν τις πληροφορίες αυτές. Τα σεναρία κώδικα που επικοινωνούν με την βάση δεδομένων στην συνέχεια συνδέονται με τα σεναρία κώδικα που ελέγχουν τα 3D αντικείμενα (Εικόνα 10 Εικόνα 10).



Εικόνα 10 Σύνδεση μεταξύ βάσης και σεναρίων κώδικά

Για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα δημιουργήθηκε μια διεπαφή ώστε να μπορεί να ελέγξει τις λειτουργίες του συστήματος που αφορούν στον όγκο κίνησης, στον χρόνο των φαναριών και στην ενημέρωση του συστήματος από την βάση δεδομένων. Ο χρήστης μέσα από την διεπαφή του συστήματος μπορεί να εισάγει δεδομένα στα σενάρια κώδικα που ελέγχουν τις λειτουργίες των 3D αντικειμένων. Ο χρήστης μπορεί με την χρήση της διεπαφής να σταματήσει, ή να ξεκινήσει την επικοινωνία μεταξύ των σεναρίων κώδικα που επηρεάζουν τα 3D αντικείμενα και των σεναρίων κώδικα που επικοινωνούν με την βάση δεδομένων (Εικόνα 11Εικόνα 11).



Εικόνα 11 Χρήση διεπαφής για αλληλεπίδραση με το σύστημα

## 4.5 Υλοποίηση συστήματος

Το ψηφιακό δίδυμο αποτελείται από πολλά επιμέρους στοιχεία, τον πραγματικό κόσμο, τον ψηφιακό, τις σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων και τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα εργαλείο το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει το περιβάλλον του ψηφιακού κόσμου αλλά και να το συνδέσει με τα υπόλοιπα στοιχεία.

### 4.5.1 Χρήση της Unity3D και της C#

Η Unity 3D είναι μία μηχανή παιχνιδιών που επιτρέπει στον χρήστη να σχεδιάσει το περιβάλλον που θέλει σε 3D, 2D ακόμα και σε VR. Με την χρήση της C# ο προγραμματιστής μπορεί να ελέγξει όλα τα αντικείμενα που υπάρχουν στη σκηνή, να ελέγξει τα φυσικά τους μεγέθη, και να προγραμματίσει τις λειτουργίες και τις αλληλεπιδράσεις τους. Στην Unity3D οι C# συναρτήσεις καλούνται περιοδικά κάθε φορά που δημιουργείται ένα συμβάν. Για να το πετύχει αυτό η Unity 3D χρησιμοποιεί ένα σύστημα ονοματοδοσίας για να προσδιορίσει ποια συνάρτηση θα κληθεί για ένα συγκεκριμένο συμβάν.

Δυο βασικές τέτοιες συναρτήσεις είναι η Update που εκτελείται πριν από τη σχεδίαση κάθε καρέ ενός game object, και η Start που καλείται ακριβώς πριν από την πρώτη σχεδίαση του καρέ του game object. Υπάρχουν ακόμα και συναρτήσεις όπως η FixedUpdate και η LateUpdate που εκτελούνται σε κάθε καρέ σαν την βασική Update αλλά σε διαφορετικό χρόνο. Η FixedUpdate καλείται δύο φορές σε κάθε καρέ ενώ η LateUpdate στο τέλος κάθε καρέ. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να προσφέρουν στον χρήστη περισσότερες επιλογές σχετικά με την σειρά εκτέλεσης των λειτουργιών που ορίζει.

Για την χρήση στοιχείων που αφορούν στην γραφική διεπαφή με τον χρήστη (GUI) η Unity 3D χρησιμοποιεί συναρτήσεις που εκτελούνται κάθε φορά που χρησιμοποιείται ένα στοιχείο διεπαφής όπως ένα κουμπί ή ένα πλαίσιο κειμένου. Μία τέτοια συνάρτηση είναι η OnGUI που καλείται κάθε φορά που ο χρήστης αλληλεπιδρά με ένα στοιχείο διεπαφής και μπορεί να πραγματοποιήσει πολλαπλές κλήσεις ακόμα και σε ένα καρέ.

Η Unity 3D έχει ένα ενσωματωμένο σύστημα για την αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων που ονομάζεται PlayerPrefs. Το PlayerPrefs επιτρέπει στον χρήστη να αποθηκεύσει δεδομένα στο πρόγραμμα και να τα έχει διαθέσιμα τοπικά ή online κάθε φορά που ξεκινάει το πρόγραμμα. Τα δεδομένα αυτά είναι ρυθμίσεις του χρήστη ή του προγράμματος. Το σύστημα PlayerPrefs έχει περιορισμένες δυνατότητες και δεν ενδείκνυται για την επεξεργασία και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Για αυτό τον λόγο η Unity 3D επιτρέπει την εύκολη σύνδεση με βάσεις δεδομένων για να γίνει καλύτερη η διαχείριση και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων όταν αυτό είναι απαραίτητο.

Η Unity 3D προσφέρει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για την δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου. Το Unity Asset Store προσφέρει πληθώρα αντικειμένων όπως 3D οχήματα, δρόμους, φανάρια και άλλα, που είναι έτοιμα για χρήση. Η Unity3D έχει μία ευρεία κοινότητα game developers που συνεχώς εμπλουτίζουν το Unity Asset Store με νέο υλικό προσφέροντας βοήθεια και επεξηγηματικό υλικό στους προγραμματιστές της μηχανής παιχνιδιών.

#### **4.5.2 Χρήση της MongoDB**

Η δημιουργία του συστήματος στην Unity 3D απαιτεί την αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων. Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί το σύστημα, είναι δεδομένα που δίνει ο χρήστης ή δεδομένα που παράγει το σύστημα. Για να μπορέσουν να είναι διαθέσιμα παντού ,όταν ο χρήστης τα ζητάει και να μην αλλάζουν κάθε φορά που ξεκινάει το σύστημα ,η Unity 3D επιτρέπει την εύκολη σύνδεση του συστήματος με μια βάση δεδομένων για την αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση των δεδομένων που ενδιαφέρουν τον χρήστη. Η βέλτιστη επιλογή έχει να κάνει με τις απαιτήσεις του συστήματος αλλά και τις γνώσεις του δημιουργού του συστήματος.

Από τις πιο διαδεδομένες βάσεις δεδομένων είναι οι βάσεις που χρησιμοποιούν την SQL (Structured Query Language) όπως οι SQLite, MySQL, PostgreSQL. Η SQL είναι η γλώσσα που επεξεργάζεται τα δεδομένα ενώ οι MySQL, MS SQL, SQLite είναι οι βάσεις που τα αποθηκεύουν. Οι βάσεις αυτές ενώ χρησιμοποιούν την ίδια γλώσσα, δηλαδή την SQL, έχουν διαφορές στην διάλεκτο της γλώσσας και στον τρόπο που αποθηκεύουν και χρησιμοποιούν τα δεδομένα.

**SQLite:** Μερικά προτερήματα της SQLite είναι ότι χρησιμοποιεί πολύ λίγο χώρο και δεν επιβαρύνει το σύστημα, επίσης δεν χρειάζεται εξωτερικές συνδέσεις που πρέπει να εγκατασταθούν στο σύστημα για να λειτουργήσει. Είναι αρκετά φιλική προς τον χρήστη, δεν τρέχει σε κάποιο server και έτσι δεν χρειάζεται να σταματήσει ή να ξεκινήσει ποτέ, οπότε είναι συνεχώς έτοιμη για χρήση. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα μόνο αρχείο και μπορούν να μεταφερθούν εύκολα παντού.

Υπάρχουν όμως και κάποια αρνητικά στην SQLite που πρέπει ο σχεδιαστής του συστήματος να γνωρίζει πριν κάνει την επιλογή. Ενώ πολλές διεργασίες μπορούν ταυτόχρονα να έχουν πρόσβαση στην βάση, μονό μία μπορεί κάθε φορά να κάνει αλλαγές. Επειδή όλα τα δεδομένα καταγράφονται σε ένα αρχείο δεν δίνεται η δυνατότητα να υπάρχουν διαβαθμίσεις στην πρόσβαση που έχει ένας χρήστης στην βάση. Ή θα έχει πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα και θα μπορεί να τα επεξεργαστεί ή δεν θα έχει καθόλου. Ενώ τέλος το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιεί κάποιο server μειώνει τις δυνατότητες ασφάλειας και προστασίας που μπορεί να παρέχει η βάση. Ως εκ τούτου, αφού το ψηφιακό δίδυμο θα αποθηκεύει τιμές από το φυσικό κόσμο συνεχώς, μέσω αισθητήρων, η συγκεκριμένη βάση δεν ενδείκνυται για χρήση καθώς πολλές ταυτόχρονες διεργασίες απαιτούν να τροποποιούν τη βάση.

**MySQL:** Η MySQL είναι μια από τις πιο διαδεδομένες βάσεις. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη αφθονία σε υλικό γύρω από την MySQL για το πώς λειτουργεί και πώς σχεδιάζεται και ότι μπορεί να χρειαστεί ο δημιουργός της βάσης. Υπάρχει προεγκατεστημένο ένα αρχείο που βοηθάει με την ασφάλεια των δεδομένων, επιτρέπει την δημιουργία επιπέδων πρόσβασης και κωδικών πρόσβασης για τους χρήστες ώστε να διαχωρίζεται καλύτερα ο ρόλος και η πρόσβαση των χρηστών. Χάρη στον τρόπο που χρησιμοποιεί κάποια από τα χαρακτηριστικά της SQL η MySQL έχει καταφέρει να γίνει μια από τις πιο γρήγορες βάσεις δεδομένων.

Μερικά από τα μειονεκτήματα της MySQL είναι ότι επειδή σχεδιάστηκε για να είναι μια γρήγορη και εύκολη στην χρήση βάση έχει κάποιους περιορισμούς στην χρήση της SQL. Ένα σημαντικό ζήτημα που πρέπει να γνωρίζει κάποιος πριν κάνει την επιλογή του είναι ότι υπάρχουν διαφορετικές άδειες χρήσης του προϊόντος, υπάρχει η δωρεάν έκδοση αλλά και πολλές διαφορετικές επί πληρωμή εκδόσεις που διαφέρουν ως προς τις δυνατότητες που δίνουν στον χρήστη.

**PostgreSQL:** Η PostgreSQL έχει πλήρως ελεύθερο το λογισμικό της και στηρίζεται πολύ στους χρήστες που το χρησιμοποιούν. Αυτοί δίνουν τις κατευθύνσεις για το πώς θα εξελιχθεί το λογισμικό και οδηγίες για το πώς μπορεί να το χρησιμοποιήσει κάποιος. Προσπαθεί να μένει όσο πιο κοντά γίνεται στα πρότυπα της SQL και σύμφωνα με τα έγγραφα της PostgreSQL υποστηρίζει 160 από τα 179 χαρακτηριστικά της SQL συν μια τεράστια λίστα από επιπλέον χαρακτηριστικά. Ακόμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επεκτείνει την βάση και την επεξεργασία των δεδομένων είτε μέσω προγραμματισμού είτε μέσα από τις λειτουργίες που δίνει.

Τα προβλήματα που αφορούν στην PostgreSQL είναι ότι χρησιμοποιεί πάρα πολύ χώρο .Για κάθε νέα σύνδεση στην βάση δημιουργείται μια καινούργια διαδικασία που καταλαμβάνει περίπου 10MB. Ενώ ένα ακόμα πρόβλημα είναι ότι δεν έχει πολύ μεγάλο κοινό και για ένα πρόγραμμα ανοιχτού λογισμικού αυτό σημαίνει ότι κάποια πράγματα έχουν μείνει πίσω και δεν εξελίσσονται όσο γρήγορα θα έπρεπε.

**NoSQL:** Μια άλλη κατηγορία βάσεων δεδομένων είναι οι NoSQL βάσεις αυτές δηλαδή που δεν αποθηκεύουν τα δεδομένα τους σε πίνακες όπως οι SQL βάσεις. Η γενική αντίληψη γύρω από το θέμα είναι πως οι βάσεις που δεν χρησιμοποιούν τους πίνακες για να αποθηκεύουν δεδομένα μπορούν να μειώσουν το κόστος αποθήκευσης αλλά και να διευκολύνουν την πρόσβαση στα δεδομένα. Στις βάσεις αυτές δεν χρειάζεται να ορίσουμε από την αρχή τον αριθμό των δεδομένων που θα αποθηκευτούν και στην περίπτωση του συγκεκριμένου διδύμου τις καθιστά ιδανικές. Μερικά παραδείγματα είναι η MongoDB και η FireBase.

**MongoDB:** Η MongoDB είναι δωρεάν και επιπλέον η ομάδα που την δημιούργησε δίνει την δυνατότητα για δωρεάν online εκμάθηση. Δίνει την δυνατότητα να αποθηκευτούν διαφορετικοί τύποι δεδομένων με χαμηλό κόστος. Επίσης μπορεί η βάση να αλλάξει το μέγεθος της με πολύ χαμηλό κόστος και χωρίς να επηρεαστεί η ταχύτητα του συστήματος. Για αυτόν τον λόγο έγινε και η επιλογή της βάσης για το σύστημα.

Το πρόβλημα που αφορά στην MongoDB είναι ότι είναι πολύ δύσκολο και περίπλοκο να γίνει ένα αντίγραφο της βάσης για λόγους ασφάλειας και συντήρησης.

**FireBase:** Η FireBase είναι εύκολη στην χρήση και οι δημιουργοί της έχουν φτιάξει και μερικά πολύ αναλυτικά βοηθήματα. Μέχρι ένα συγκεκριμένο αποθηκευτικό όριο όλες οι

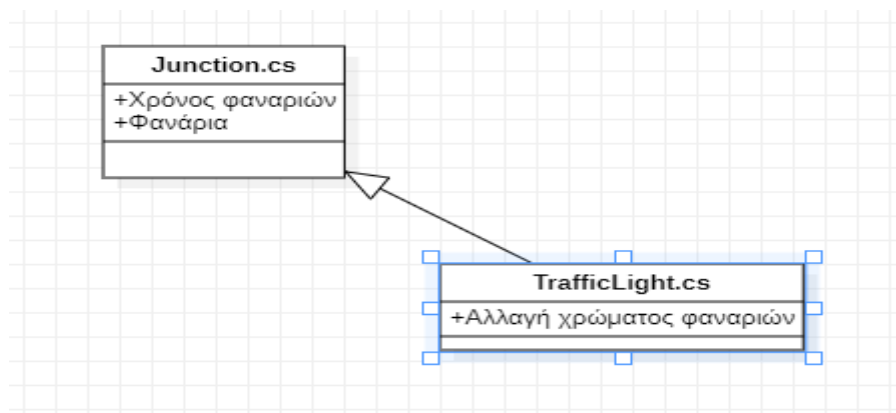
λειτουργίες και οι υπηρεσίες είναι δωρεάν. Οι υπηρεσίες που παρέχει δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη μόνο με μερικά κλικ να ξεκινήσει να χρησιμοποιεί την βάση. Απαιτεί πολύ λίγες γνώσεις για να ξεκινήσει ο χρήστης να δουλεύει.

Τα προβλήματα της Firebase έχουν να κάνουν κυρίως με την αποθήκευση των δεδομένων. Ο χώρος αποθήκευσης είναι περιορισμένος και η μεταφορά τους σε άλλες εφαρμογές είναι πολύ περιορισμένη.

### 4.5.3 Υλοποίηση

#### 3D Μοντέλα

Η υλοποίηση ξεκίνησε το σχεδιασμό του γεωμετρικού μοντέλου στη Unity3D και τη δημιουργία των απαραίτητων στοιχείων για την δημιουργία του οδικού δικτύου. Τα στοιχεία αυτά είναι οι δρόμοι, ευθείες (Εικόνα 14, Εικόνα 15) και διασταυρώσεις (Εικόνα 16) τα φανάρια καθώς και τα οχήματα που θα κινηθούν στους δρόμους. Τα στοιχεία των δρόμων είναι προεγκατεστημένα αντικείμενα της Unity 3D που πάνω τους έχουν textures με εικόνες από πραγματικούς δρόμους για την απόδοση πιο ρεαλιστικής εμφάνισης. Τα φανάρια είναι επίσης προεγκατεστημένα αντικείμενα της Unity 3D, των οποίων η συμπεριφορά δημιουργήθηκε με το παρακάτω σενάριο κώδικα (Εικόνα 12, Εικόνα 13) ώστε να αλλάζουν χρώματα μεταξύ πράσινου και κόκκινου.



Εικόνα 12 Σύνδεση σεναρίων για την αλλαγή χρώματος

```

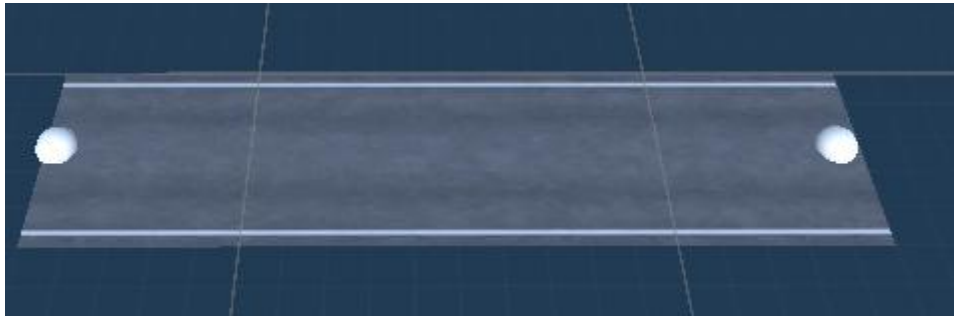
public class TrafficLight : MonoBehaviour
{
    public MeshRenderer Renderer;

    public void SetLight(bool input)
    {
        Renderer.material.SetColor("_Color", input ? Color.green : Color.red );
    }
}

```

### Εικόνα 13 σενάριο κώδικα για την αλλαγή χρώματος στα φανάρια

Από το Asset Store της Unity 3D επιλέχθηκαν τα 3D μοντέλα των οχημάτων (Εικόνα 17) τα οποία δεν περιέχουν κάποιο σενάριο κώδικα για την κίνηση τους. Με την επιλογή και δημιουργία των 3D μοντέλων μπορούμε πλέον να δημιουργήσουμε το κομμάτι του οδικού δικτύου που μας ενδιαφέρει.

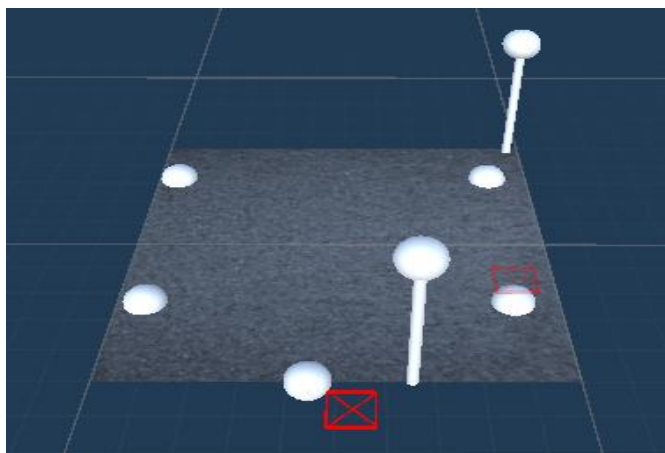


Εικόνα 14 δρόμος μιας λωρίδας

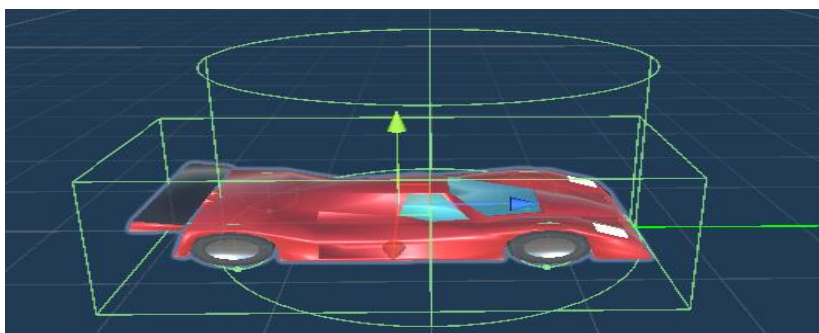


Εικόνα 15 δρόμος δύο λωρίδων





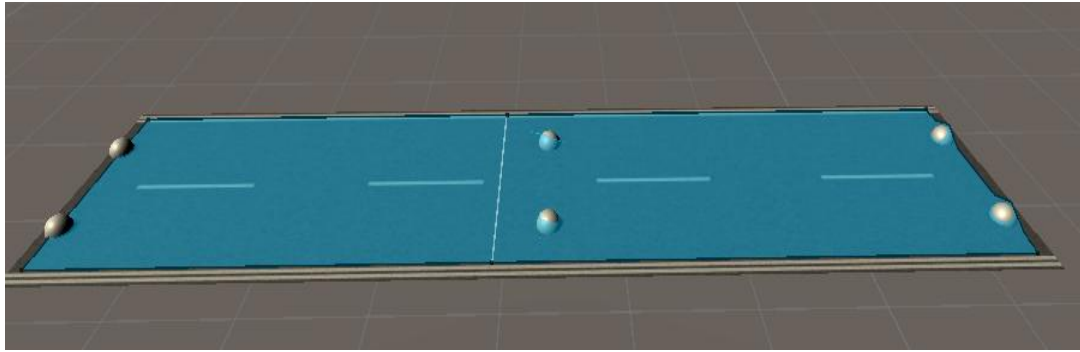
Εικόνα 16 διασταύρωση



Εικόνα 17 όχημα

### Δημιουργία κίνησης

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η κίνηση στους δρόμους. Για την κίνηση των οχημάτων εντός των ορίων ενός δρόμου χρησιμοποιήθηκε το NavMesh. Το NavMesh είναι ένα εργαλείο της Unity3D που δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε τα σημεία όπου το όχημα μπορεί να κινηθεί (Εικόνα 18Εικόνα 18). Δίνει ακόμα την δυνατότητα να επιλεγούν διαφορετικές ζώνες κίνησης, για τη δημιουργία ανηφορικών και κατηφορικών δρόμων με τη χρήση ιδιοτήτων φυσικής πάνω στα οχήματα. Ο χρωματικός σχεδιασμός μπορεί επίσης να αλλάξει για να γίνουν ευκολότερα κατανοητές οι ζώνες κίνησης.



**Εικόνα 18** μπλε περιοχές στις οποίες μπορεί να κινηθεί το όχημα

Το όχημα μπορεί να κινηθεί εντός του δρόμου αλλά δεν γνωρίζει το που πρέπει να πάει. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε ένα σύστημα με σημεία στόχους (way points) για να μπορέσει το όχημα να ακολουθήσει (Εικόνα 19). Το σύστημα αυτό αποτελείται από αντικείμενα της Unity 3D, απλές σφαίρες με ένα σημείο σύγκρουσης, οι οποίες με ένα σενάριο κώδικα συνδέονται η μια με την άλλη. Όταν ένα όχημα έρθει σε επαφή με μια από αυτές τις σφαίρες τότε αυτή η σφαίρα του δίνει τον επόμενο στόχο που πρέπει να φτάσει (Εικόνα 20). Το σενάριο κώδικα των way point επιτρέπει σε μια σφαίρα να ομαδοποιηθεί με μια ή περισσότερες άλλες δίνοντας έτσι την δυνατότητα στο όχημα να αλλάξει κατεύθυνση, αριστερά, δεξιά, ή ευθεία.

Η επιλογή της κατεύθυνσης γίνεται με βάσει πιθανότητες που ανακαλούνται από την βάση δεδομένων, στην οποία καταχωρούνται τα δεδομένα του φυσικού κόσμου, δίνοντας τη δυνατότητα ενημέρωσης του φόρτου κίνησης σε κάποιο δρόμο σε πραγματικό χρόνο. Κάθε κομμάτι δρόμου είναι αυτόνομο σε σχέση με τα υπόλοιπα και επομένως μια αλλαγή σε κάποιο από αυτά δεν θα επιφέρει αλλαγή και στα υπόλοιπα.



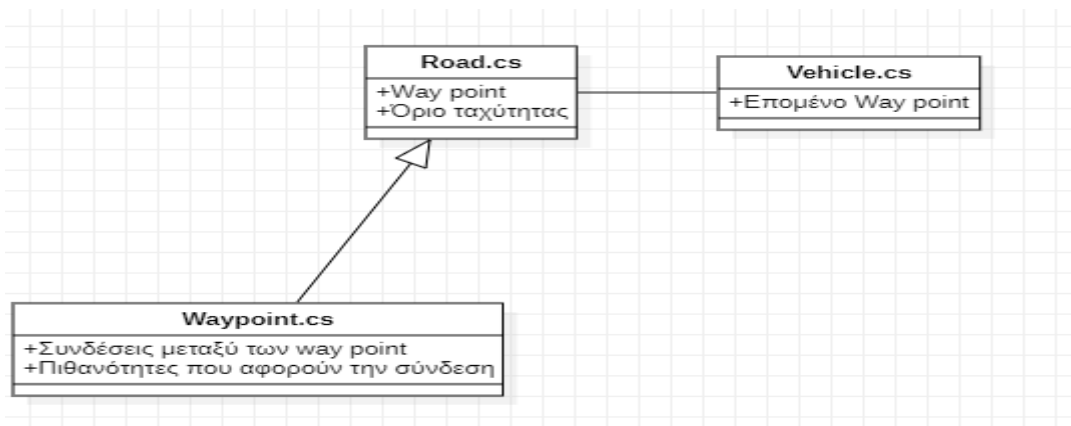
**Εικόνα 19** Οι σφαίρες των way point

```

private void SwitchRoad(NavConnection newConnection)
{
    RegisterVehicle(m_CurrentNavSection, false);
    speed = TrafficSystem.Instance.
        GetAgentSpeedFromKPH(Mathf.Min(newConnection.navSection.speedLimit, maxSpeed));
    agent.speed = speed;
    m_CurrentNavSection = newConnection.navSection;
    RegisterVehicle(m_CurrentNavSection, true);
    m_CurrentOutConnection = newConnection.GetOutConnection();
    if(m_CurrentOutConnection != null)
        agent.destination = m_CurrentOutConnection.transform.position;
}

```

Εικόνα 20 Σενάριο κώδικα το όχημα αλλάζει δρόμο και παίρνει τον επόμενο στόχο

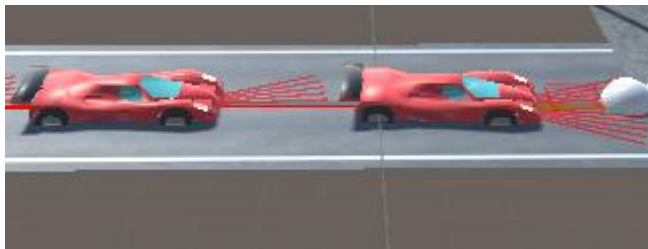


Εικόνα 21 Συνδέσεις μεταξύ των σεναρίων

Το επόμενο βήμα είναι το όχημα να κινηθεί στο δρόμο τηρώντας τον κώδικα οδικής κυκλοφορίας και αποφεύγοντας τα τρακαρίσματα. Το όριο ταχύτητας ελέγχεται ξεχωριστά σε κάθε δρόμο για να μπορέσουν να δημιουργηθούν τα διαφορετικά τμήματα του οδικού δικτύου, όπως κατοικημένες περιοχές, οδοί ταχείας κυκλοφορίας κ.α.

Για την αποφυγή εμποδίων και συγκρούσεων δημιουργήθηκαν αισθητήρες στο μπροστινό μέρος του οχήματος που ελέγχουν αν υπάρχει εμπόδιο μπροστά (Εικόνα 22). Από το μπροστινό μέρος του οχήματος ξεκινούν δέκα ευθείες γραμμές με μήκος δυο units στην Unity 3D, δηλαδή δυο μέτρα σε κλίμακα, και μεταξύ τους απόσταση πέντε μοίρες. Κάθε φορά που μία από αυτές τις ευθείες προσκρούει σε ένα αντικείμενο ενημερώνει το όχημα ότι υπάρχει εμπόδιο. Αν οι

ευθείες που προσανατολίζονται στα δεξιά ή τα αριστερά του οχήματος προσκρούσουν σε ένα αντικείμενο το όχημα θα μειώσει την ταχύτητα του και θα επιχειρήσει να κατευθυνθεί στην αντίθετη πορεία για να αποφύγει το εμπόδιο. Αν οι ευθείες που προσανατολίζονται στην ευθεία του οχήματος προσκρούσουν σε εμπόδιο τότε το όχημα θα μειώσει την ταχύτητα του και θα ελέγξει ποια κατεύθυνση έχει περισσότερες ανοιχτές ευθείες για να στρίψει. Οι ευθείες επιστρέφουν ακόμα και την απόσταση στην οποία υπάρχει το εμπόδιο, αν αυτό βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη του ενός μέτρου και πενήντα εκατοστών τότε το όχημα θα σταματήσει (Εικόνα 23Εικόνα 23).

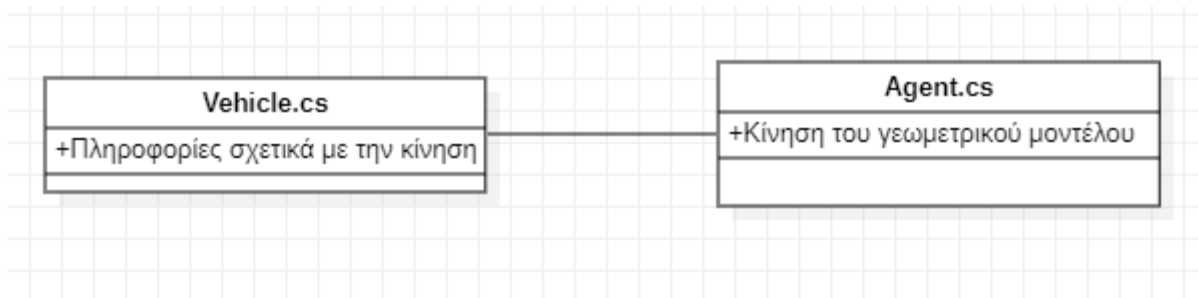


Εικόνα 22 Χρήση αισθητήρων

```
private bool CheckBlocked()
{
    float initRay = (raysNumber / 2f) * raySpacing;
    float hitDist = -1f;
    RaycastHit hit;
    for (float a = -initRay; a <= initRay; a += raySpacing)
    {
        Debug.DrawRay(raycastAnchor.transform.position,
            Quaternion.Euler(0, a, 0) * this.transform.forward * raycastLength,
            new Color(1, 0, 0, 0.5f));

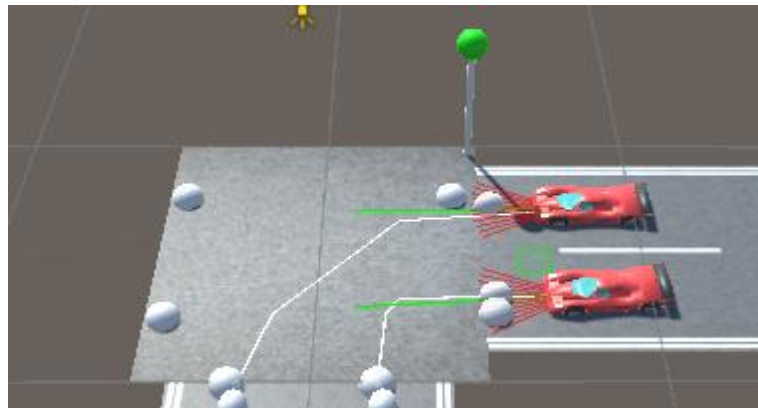
        if (Physics.Raycast(raycastAnchor.transform.position,
            Quaternion.Euler(0, a, 0) * this.transform.forward, out hit, raycastLength))
        {
            if (Vector3.Distance(raycastAnchor.transform.position, hit.point) < raycastLength)
            {
                if (hit.transform.tag == "Gib")
                    return true;
            }
        }
    }
}
```

Εικόνα 23 Σενάριο κώδικα για την δημιουργία αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων



Εικόνα 24 Σύνδεση μεταξύ των σεναρίων

Στις διασταυρώσεις υπάρχουν σημεία συγκρούσεων. Αυτά δίνουν πληροφορίες στο όχημα για το αν μπορεί το όχημα να διασχίσει την διασταύρωση, ανάλογα με το χρώμα του φαναριού που υπάρχει (Εικόνα 25 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**).



Εικόνα 25 Διασταύρωση, πράσινο και κόκκινο φανάρι

Το όχημα τώρα μπορεί να κινηθεί στο δρόμο, να ακολουθήσει τις διαδρομές που ορίζει το δίδυμο και να ακολουθήσει τους βασικούς κανόνες. Για να δοθεί στον χρήστη η δυνατότητα να επιλέξει πόσα οχήματα θα υπάρχουν στο δρόμο, κάθε κομμάτι δρόμου, εκτός από τις διασταυρώσεις, έχει ένα σημείο στο οποίο δημιουργούνται οχήματα. Τα σημεία αυτά είναι ανεξάρτητα σε κάθε δρόμο και έτσι ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ακριβώς σε ποια κομμάτια δρόμου θα δημιουργηθεί η κίνηση.

### Επικοινωνία με τη βάση δεδομένων

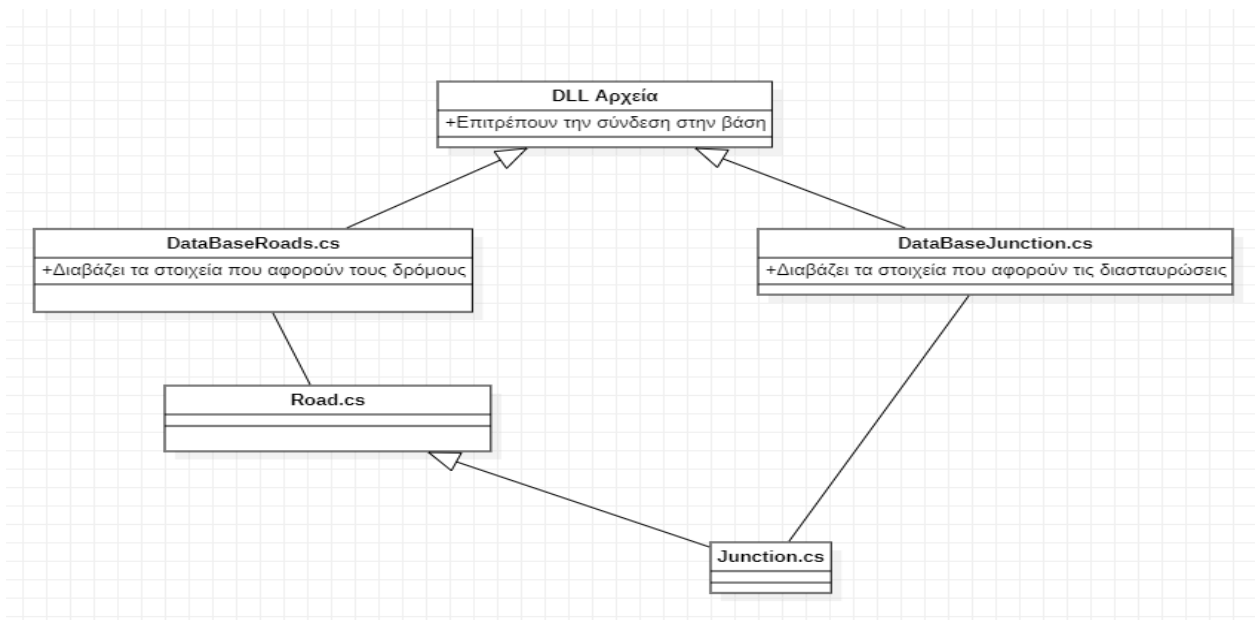
Το ψηφιακό δίδυμο που αναπτύχθηκε έχει περιορισμούς που σχετίζονται με την βάση δεδομένων, επειδή χρησιμοποιήθηκε η δωρεάν έκδοση της MongoDB, υπάρχει περιορισμός στις συνδέσεις που μπορούν να γίνουν. Η δωρεάν έκδοση επιτρέπει να γίνουν μέχρι πεντακόσιες

συνδέσεις ταυτόχρονα. Είναι απαραίτητη η σύνδεση στο διαδίκτυο για να μπορέσει το σύστημα να επικοινωνήσει με την βάση δεδομένων και να ξεκινήσει η προσομοίωση.

Τα δεδομένα που αφορούν στο όνομα των δρόμων καθώς και στο πόσα οχήματα θα δημιουργηθούν πάνω σε κάθε κομμάτι δρόμου ανακαλούνται από την MongoDB στην οποία αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο από το φυσικό κόσμο. Το σύστημα επικοινωνεί με την MongoDB κάθε πέντε δευτερόλεπτα για να διαβάσει τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί στην βάση (Εικόνα 26Εικόνα 26).

```
public async Task<List<LightScore>> GetCrossFromDataBase()  
{  
    var allLightsTask = collection.FindAsync(new BsonDocument());  
    var lightsAwaited = await allLightsTask;  
  
    List<LightScore> lightcores = new List<LightScore>();  
    foreach (var light in lightsAwaited.ToList())  
    {  
        lightcores.Add(DeserializeLights(light.ToString()));  
    }  
    return lightcores;  
}
```

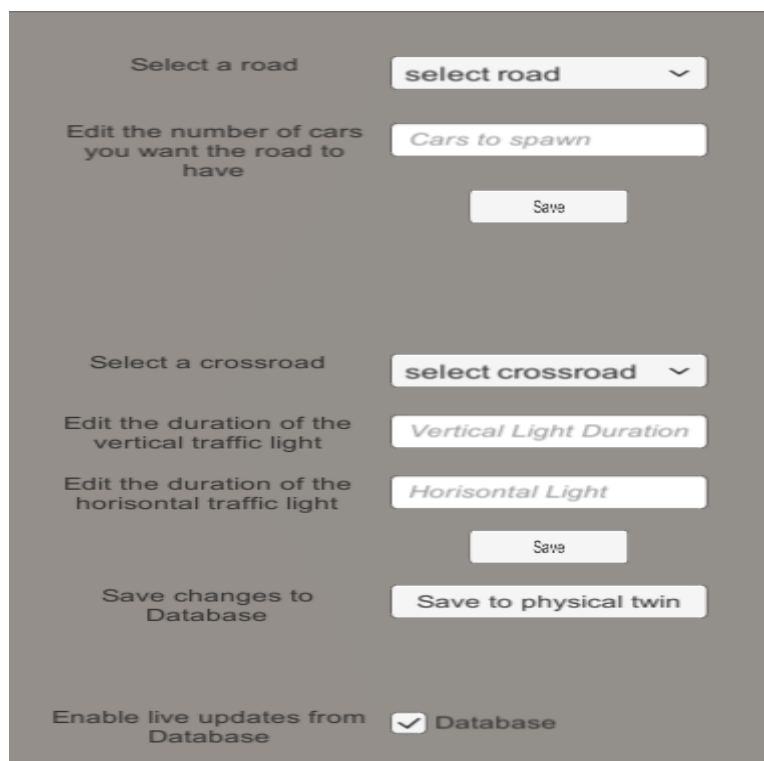
Εικόνα 26 Σενάριο για την εισαγωγή δεδομένων από την βάση



Εικόνα 27 Σύνδεση μεταξύ των σεναρίων

## Διεπαφή

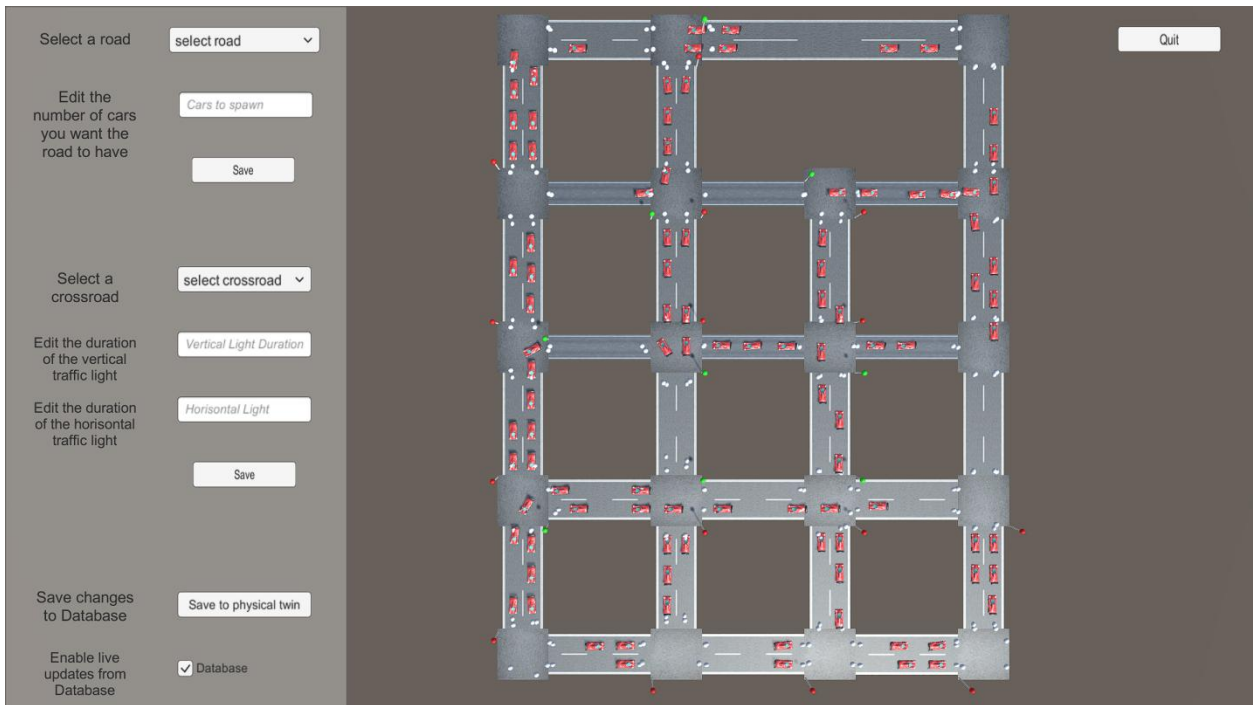
Για τον χειρισμό της προσομοίωσης από τον χρήστη δημιουργήθηκε μια διεπαφή. Η διεπαφή αυτή είναι συνεχώς ενεργή στο αριστερό τμήμα της προσομοίωσης. Ο σκοπός της διεπαφής είναι να περιλάβει τα στοιχεία που χρειάζεται ο χρήστης για να κάνει αλλαγές στην προσομοίωση και να βοηθήσει τον χρήστη να αντιληφθεί της λειτουργίες του και τις επιλογές που του παρέχονται. Μέσα στην προσομοίωση υπάρχουν δύο αναπτυσσόμενα κουμπιά από τα οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το σημείο που τον ενδιαφέρει για να κάνει τις αλλαγές πιο εύκολες και άμεσες. Κάθε φορά που ο χρήστης επιλέγει από το αναπτυσσόμενο menu, ο δρόμος που έχει επιλεγεί φωτίζεται για να γίνεται η επιλογή πιο ξεκάθαρη. Κάθε φορά που ο χρήστης επιλέγει να κάνει μια αλλαγή μέσα στο σύστημα ,αυτό σταματάει να επικοινωνεί με την βάση μέχρι ο χρήστης να επιτρέψει και πάλι την επικοινωνία. Έτσι ο χρήστης έχει την δυνατότητα να κάνει τις αλλαγές που θέλει, να δοκιμάσει διαφορετικά σενάρια χωρίς όμως να παρέμβει στη βάση δεδομένων και να αλλοιώσει τα δεδομένα ή το σύστημα που τα συλλέγει (Εικόνα 28). Η χρήση της MongoDB δίνει ακόμα την δυνατότητα για σημαντικές μελλοντικές επεκτάσεις.



The image shows a control menu for a simulation. It features several interactive elements on a dark grey background:

- Select a road:** A dropdown menu with the text "select road" and a downward arrow.
- Edit the number of cars you want the road to have:** A text input field containing "Cars to spawn" and a "Save" button below it.
- Select a crossroad:** A dropdown menu with the text "select crossroad" and a downward arrow.
- Edit the duration of the vertical traffic light:** A text input field containing "Vertical Light Duration".
- Edit the duration of the horizontal traffic light:** A text input field containing "Horisontal Light" (note the typo).
- Save changes to Database:** A "Save to physical twin" button.
- Enable live updates from Database:** A checkbox that is checked, with the label "Database" next to it.

Εικόνα 28 Menu για την επιλογή δρόμων



Εικόνα 29 Στιγμιότυπο από την λειτουργία της προσομοίωσης

## 4.6 Αξιολόγηση ευχρηστίας

Ο σκοπός των πειραμάτων είναι η εξαγωγή συμπεράσματος σχετικά με την ευχρηστία του συστήματος. Είναι σημαντικό οι χρήστες να μπορούν να κατανοήσουν και να χρησιμοποιήσουν το σύστημα και όλες του τις λειτουργίες. Κατά τη διαδικασία των πειραμάτων έγινε χρήση της μεθόδου Ομιλούντων υποκειμένων (Think aloud) κατά την οποία οι χρήστες έπρεπε να σκέφτονται μεγαλόφωνα για να καταγράφεται η σκέψη τους και να γίνεται αντιληπτός ο λόγος που κάνουν κάθε ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο αντλήθηκε το νοητικό μοντέλο των χρηστών και εν τέλει συγκρίθηκε με το νοητικό μοντέλο του σχεδιαστή του προγράμματος.

### 4.6.1 Πειραματική διαδικασία

Σε κάθε προσομοίωση του διδύμου ο χρήστης επιλέγει τον όγκο κίνησης που θα υπάρχει και ρυθμίζει κάποιους βασικούς κανόνες, τον χρόνο των φαναριών και κάποιες πιθανότητες για τις διαδρομές που θα ακολουθήσει ένα όχημα. Το δίδυμο ξεκινάει την προσομοίωση και γεμίζει



με οχήματα τον δρόμο. Ο ερευνητής έτσι μπορεί να πάρει μια ρεαλιστική εικόνα του δικτύου και να δει αν το οδικό δίκτυο μπορεί να διαχειριστεί τον όγκο ή θα δημιουργηθούν μπουτιλιαρίσματα.

Για την πειραματική διαδικασία επιλέχθηκαν δέκα χρήστες με διαφορετικές ηλικίες και γνωστικά αντικείμενα. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι και οι χρήστες είναι κάτοικοι της πόλης του Βόλου και μπορούν να αναγνωρίσουν με ευκολία τις οδούς τις οποίες το δίδυμο αναπαριστά.

Τα πειραματικά σενάρια που δόθηκαν στον κάθε χρήστη ήταν τρία. Κάθε σενάριο είχε διαφορετικό όγκο κίνησης και ζητούσε από τους χρήστες αρχικά να εκτελέσουν συγκεκριμένες ενέργειες και στην συνέχεια να παρατηρήσουν και να διαχειριστούν τα προβληματικά σημεία όπου και αν υπήρχαν.

### **Σενάριο 1: Εξοικείωση με το πρόγραμμα**

Το πρώτο σενάριο είχε χαμηλό όγκο κίνησης. Σε κάθε δρόμο με δυο λωρίδες εμφανιζόταν δύο οχήματα και σε κάθε δρόμο με μία λωρίδα εμφανιζόταν ένα όχημα. Το πρώτο βήμα για τους χρήστες ήταν να χρησιμοποιήσουν την διεπαφή του συστήματος για να αλλάξουν τα δεδομένα που αφορούν τον όγκο κίνησης σε συγκεκριμένα κομμάτια δρόμων που τους δόθηκαν ονομαστικά. Στο επόμενο βήμα έπρεπε χρησιμοποιώντας και πάλι την διεπαφή να αλλάξουν τους χρόνους των φαναριών σε συγκεκριμένες διασταυρώσεις που τους δόθηκαν ονομαστικά.

### **Σενάριο 2: Επίλυση προβληματικού σημείου χαμηλής έντασης**

Στο δεύτερο σενάριο ο όγκος κίνησης αυξήθηκε και σε κάθε δρόμο με δυο λωρίδες εμφανιζόταν τρία οχήματα και σε κάθε δρόμο με μία λωρίδα εμφανιζόταν δύο οχήματα. Το ζητούμενο ήταν η παρακολούθηση της προσομοίωσης και η λήψη συγκεκριμένων αποφάσεων για την επίλυση του κυκλοφοριακού προβλήματος. Με την επιτυχή επίλυση του προβλήματος οι χρήστες θα έπρεπε να αποθηκεύσουν τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις στην βάση δεδομένων.

### **Σενάριο 3: Επίλυση προβληματικού σημείου υψηλής έντασης**

Στο τρίτο σενάριο ο όγκος κίνησης αυξήθηκε και πάλι, σε κάθε δρόμο με δυο λωρίδες εμφανιζόταν πέντε οχήματα και σε κάθε δρόμο με μία λωρίδα εμφανιζόταν τρία οχήματα. Το ζητούμενο ήταν να παρακολουθήσουν την εξέλιξη της προσομοίωσης και να πάρουν αποφάσεις

σχετικά με τα σημεία στα οποία εμφανιζόταν μπουτιλιάρισμα. Οι χρήστες μπορούσαν να κάνουν όποιες αλλαγές θεωρούσαν απαραίτητες για να βελτιώσουν τα προβληματικά σημεία. Μόλις οι χρήστες ήταν ικανοποιημένοι με τις αλλαγές που πραγματοποιούσαν έπρεπε να αποθηκεύσουν τις αλλαγές στην βάση δεδομένων.

#### **4.6.2 Ανάλυση πειραμάτων**

Στο πρώτο σενάριο οι χρήστες έπρεπε να κάνουν συγκεκριμένες ενέργειες που τους δόθηκαν. Το πρώτο στάδιο του πειράματος ήταν να επιλέξουν από την διεπαφή τρία συγκεκριμένα κομμάτια δρόμων και να αλλάξουν τα δεδομένα που αφορούσαν στον όγκο κίνησης στα κομμάτια δρόμων που τους δόθηκαν. Οι χρήστες μπόρεσαν με ευκολία και χωρίς λάθη να εντοπίσουν το κομμάτι της διεπαφής που αφορούσε τα κομμάτια δρόμων. Όταν πάτησαν πάνω στο αναπτυσσόμενο μενού εμφανίστηκαν όλες οι επιλογές των δρόμων που ήταν διαθέσιμες. Μερικοί από τους χρήστες κατάφεραν χωρίς λάθος να εντοπίσουν τα κομμάτια που τους ζητήθηκαν, να κάνουν τις αλλαγές που τους ζητήθηκαν και να πατήσουν το κουμπί για να εφαρμοστούν οι αλλαγές. Κάποιοι χρήστες έκαναν λάθος κατά την επιλογή του κομματιού που τους ζητήθηκε. Το λάθος αυτό το αντιλήφθηκαν αμέσως και έκαναν την σωστή επιλογή πριν προχωρήσουν στην εισαγωγή των δεδομένων που τους ζητήθηκε.

Στο δεύτερο στάδιο του σεναρίου οι χρήστες έπρεπε να επιλέξουν από την διεπαφή δύο συγκεκριμένες διασταυρώσεις και να αλλάξουν τους χρόνους των φαναριών. Αυτή τη φορά όλοι οι χρήστες εντόπισαν και επέλεξαν τις διασταυρώσεις που τους ζητήθηκαν και έκαναν τις αλλαγές χωρίς λάθος.

Στο δεύτερο σενάριο οι χρήστες έπρεπε να λύσουν ένα προβληματικό σημείο που τους δόθηκε σε μια διασταύρωση με αυξημένη κίνηση. Εδώ οι χρήστες μπορούσαν να κάνουν ελεύθερες επιλογές για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Παρότι φάνηκε να υπάρχουν διαφορετικές σκέψεις και κατευθύνσεις για την λύση του προβλήματος το βασικό σενάριο που ακλούθησαν οι χρήστες ήταν να αλλάξουν τους χρόνους των φαναριών στην διασταύρωση που παρουσίαζε το πρόβλημα και στην συνέχεια στις γύρω διασταυρώσεις. Ένα μικρό ποσοστό εκτός από την αλλαγή στους χρόνους των φαναριών επέλεξε να κάνει αλλαγές και στον όγκο κίνησης μειώνοντας τα οχήματα για να αποσυμφορήσει την διασταύρωση.

Το τρίτο σενάριο ήταν παρόμοιο με το δεύτερο. Η διαφορά ήταν στον όγκο κίνησης που υπήρχε στο σύστημα. Λόγω του αυξημένου όγκου πολύ γρήγορα δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά προβληματικά σημεία που οι χρήστες έπρεπε να αντιμετωπίσουν. Οι χρήστες ακολούθησαν την ίδια τακτική για να λύσουν τα προβληματικά σημεία αλλάζοντας τους χρόνους των φαναριών στις διασταυρώσεις. Αυτή τη φορά περισσότεροι χρήστες μείωσαν τον όγκο κίνησης για να αποσυμφορήσουν τα προβληματικά σημεία.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων φάνηκε πως οι χρήστες είχαν μια δυσκολία να επιλέξουν από τα αναπτυσσόμενα μενού τα κομμάτια που τους ενδιέφεραν. Οι επιλογές τους φάνηκαν πολλές και το γεγονός ότι κομμάτια δρόμου που ανήκουν στην ίδια οδό έχουν το ίδιο όνομα με διαφορετική την παράμετρο του αριθμού φάνηκε να δυσκολεύει τους χρήστες. Όταν ένα κομμάτι δρόμου επιλέγεται από το μενού αυτό φωτίζεται για να γίνει καλύτερα κατανοητό το ποιο κομμάτι επιλέχθηκε. Αυτό φάνηκε να βοηθάει τους χρήστες. Τα στατιστικά από τους χρόνους εκτέλεσης των εντολών δείχνουν ότι οι χρήστες μπόρεσαν πιο γρήγορα να εντοπίσουν τα κομμάτια των δρόμων όταν αυτά τους δόθηκαν ονομαστικά σε σχέση με όταν η επιλογή τους ήταν ελεύθερη. Παρόλα αυτά φαίνεται πως κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων οι επιλογές τους άρχισαν να γίνονται πιο γρήγορες πράγμα που υποδηλώνει ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα μπόρεσαν να αποκτήσουν μια εξοικείωση με το πρόγραμμα.

Με την ολοκλήρωση των πειραμάτων οι χρήστες κλήθηκαν να αξιολογήσουν το σύστημα. Όλοι τους βρήκαν το σύστημα σχετικά απλό στον χειρισμό του. Ένας χρήστης πρότεινε να γίνει μια αλλαγή στο σύστημα. Πρότεινε το όνομα των δρόμων να αναγράφεται πάνω στους δρόμους για να γίνεται πιο εύκολη η επιλογή των δρόμων. Κάποιος άλλος χρήστης ανέφερε πως είχε πρόβλημα στο να αναγνωρίσει τις οδούς και θα ήθελε να δει κάποια αλλαγή σχετικά με αυτό.

**Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 1 εξοικείωση με το πρόγραμμα**

Ενέργεια	Χρόνος εκτέλεσης μ.ο.	Αριθμός λαθών μ.ο.	Χρόνος διόρθωσης λαθών μ.ο.
Επιλογή δρόμου «Ιάσονος 65» και εισαγωγή αριθμού οχημάτων «8»	15 δευτερόλεπτα	1	17 δευτερόλεπτα
Επιλογή δρόμου «28 <sup>ης</sup> Οκτωβρίου 30» και εισαγωγή αριθμού οχημάτων «5»	13 δευτερόλεπτα	1	15 δευτερόλεπτα
Επιλογή δρόμου «Καρτάλη 30» και εισαγωγή αριθμού οχημάτων «7»	9 δευτερόλεπτα	0	
Επιλογή διασταύρωσης «Ιωλκού με Δημητριάδος» και εισαγωγή χρόνου στο κάθετο φανάρι «8» εισαγωγή χρόνου στο οριζόντιο φανάρι «5»	12 δευτερόλεπτα	0	
Επιλογή διασταύρωσης «Καρτάλη με 28 <sup>ης</sup> Οκτωβρίου» και εισαγωγή χρόνου στο κάθετο φανάρι «10» εισαγωγή χρόνου στο οριζόντιο φανάρι «8»	18 δευτερόλεπτα	1	20 δευτερόλεπτα

**Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 2 επίλυση προβληματικού σημείου**

Ενέργεια	Αριθμός ενεργειών μ.ο.	Χρόνος εκτέλεσης μ.ο.	Ποσοστό βελτίωσης
Αποσυμφόρηση προβληματικού σημείου	5	25 δευτερόλεπτα	85%

**Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 3 ελεύθερη επιλογή**

Ενέργεια	Αριθμός ενεργειών μ.ο.	Χρόνος εκτέλεσης μ.ο.	Ποσοστό βελτίωσης
Αποσυμφόρηση προβληματικού σημείου 1	5	23 δευτερόλεπτα	75%
Αποσυμφόρηση προβληματικού σημείου 2	6	23 δευτερόλεπτα	70%

## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Το ψηφιακό δίδυμο που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας είναι ένα εργαλείο στα χέρια των χρηστών που μελετούν και παίρνουν αποφάσεις σχετικά με το οδικό δίκτυο της πόλης τους Βόλου και τις ενδεχόμενες αλλαγές σε αυτό. Το ψηφιακό δίδυμο αναπαριστά το οδικό δίκτυο, περιέχει δεδομένα σχετικά με τον όγκο κίνησης, τους κανόνες κίνησης στο οδικό δίκτυο και τις επιλογές των οδηγών σχετικά με την κατεύθυνση που ακολουθούν. Οι χρήστες κατά την διάρκεια της προσομοίωσης μπορούν να κάνουν αλλαγές που αφορούν τον όγκο κίνησης και τον χρόνο λειτουργίας των φαναριών. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να έχουν μια ρεαλιστική εικόνα σχετικά με το πόσα οχήματα μπορεί να διαχειριστεί, σε ποια κομμάτια υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση και έχει τις απαραίτητες επιλογές για να κάνει αλλαγές που θα βελτιώσουν τα προβλήματα του οδικού δικτύου.

Η βασικές λειτουργίες του όπως η κίνηση και η συμπεριφορά των οχημάτων βρίσκονται σε ένα αρκετά καλό σημείο και μπορούν να δώσουν μια ρεαλιστική απεικόνιση της πραγματικότητας. Η χρήση της MongoDB επιτρέπει την αποθήκευση των δεδομένων χωρίς να περιορίζει ή να καθυστερεί το σύστημα.

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν συμπεραίνουμε ότι ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις κατάλληλες ρυθμίσεις για να κάνει την κίνηση πιο ομαλή και μπορεί να αντλήσει χρήσιμα συμπεράσματα για το πώς μπορεί το υπάρχον οδικό δίκτυο να ρυθμιστεί ώστε να γίνει πιο αποτελεσματικό. Πάρα ταύτα η υποκειμενική αξιολόγηση των χρηστών έδειξε πως πρέπει να γίνουν συγκεκριμένες βελτιώσεις στην διεπαφή.

Είναι σίγουρο ότι μπορούν να γίνουν βελτιώσεις στο δίδυμο, μπορούν στο μέλλον να προστεθούν νέοι τύποι δρόμων και διασταυρώσεων που να δίνουν μεγαλύτερη γκάμα επιλογών στο σχεδιασμό του οδικού δικτύου. Μπορούν να προστεθούν περισσότερα οχήματα, τα οχήματα ανάλογα με το μέγεθος και το φορτίο τους κινούνται διαφορετικά στο δρόμο χειρίζονται διαφορετικά τις στροφές και την ταχύτητα. Όσο αφορά τις οδικές συμπεριφορές μπορούν να εμπλουτιστούν με νέα μοντέλα, για παράδειγμα νέος οδηγός, για να γίνουν οι προσομοιώσεις ακόμα πιο ρεαλιστικές. Επιπλέον μπορούν να προστεθούν διαβάσεις και πεζοί που κυκλοφορούν.

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ο χρήστης κάνει αλλαγές μέσα από την διεπαφή του συστήματος όσον αφορά τους χρόνους των φαναριών και γίνονται για να βοηθήσουν να ομαλοποιηθεί η κίνηση σε διάφορα σημεία. Μελλοντικά μπορούν να προστεθούν δυνατότητες αλλαγής της φοράς ενός δρόμου, ή τοποθέτησης ενός νέου φαναριού.

Επιπλέον, ένα σύστημα μηχανικής μάθησης μπορεί να δημιουργηθεί που θα εκπαιδεύει πάνω στις ιδιαίτερες συνθήκες του κέντρου της πόλης με σκοπό την αυτόματη πρόβλεψη και ρύθμιση του οδικού δικτύου χωρίς την ισχυρή παρέμβαση του χρήστη.

Στο μέλλον οι λειτουργίες του συστήματος μπορούν να επεκταθούν με την χρήση των τεχνολογιών augmented reality (AR) και virtual reality (VR). Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να κάνουν την διεπαφή του συστήματος πιο ελκυστική και φιλική προς τον χρήστη. Δίνουν επιπλέον την δυνατότητα η διεπαφή του συστήματος να γίνει πιο ρεαλιστική και να αποτυπώσει περισσότερα δεδομένα σχετικά με τις λειτουργίες και την κατάσταση της προσομοίωσης.

Τέλος, στις μελλοντικές εργασίες μπορεί να δημιουργηθεί ένα δίκτυο αισθητήρων στον φυσικό κόσμο, που θα στέλνει τις μετρήσεις του στην MongoDB. Επιπλέον ο φυσικός κόσμος θα μπορούσε να καταγραφεί από live δορυφορικές εικόνες με τη χρήση μεθόδων επεξεργασίας εικόνας για τον υπολογισμό του αριθμού οχημάτων σε κάθε δρόμο.

## Βιβλιογραφία

1. Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., ... & Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
2. Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9), 3563-3576.
3. Lv, Z., Yin, T., Zhang, X., Song, H., & Chen, G. (2016). Virtual reality smart city based on WebVRGIS. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 1015-1024.