



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
**ΔΠΜΣ «ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ»**

**Διπλωματική Εργασία**

«Χρήση Τεχνολογίας BIM και Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins)  
στις Κτιριακές Κατασκευές»



Σπουδαστής: Θωμάς Ευαγγέλου  
Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Χρυσή Πότσιου

Αθήνα, Ιούνιος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΠΜΣ  
«ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ»

---

**Διπλωματική Εργασία**

«Χρήση Τεχνολογίας BIM και Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins)  
στις Κτιριακές Κατασκευές»

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Χ. Πότσιου

Χ. Ιωαννίδης

Ε. Μπακογιάννης

.....

.....

.....

Καθηγήτρια  
(Επιβλέπουσα)

Καθηγητής

Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2022



## Περίληψη

Η πρόσφατη εμφάνιση του Internet of Things (IoT), οι τελευταίες τεχνολογικές καινοτομίες και η ευρεία χρήση και υιοθέτηση της τεχνολογίας BIM, προσφέρουν πολλές νέες εφαρμογές και δυνατότητες λήψης αποφάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής του δομημένου περιβάλλοντος. Η δυνατότητα σύνδεσης και παρακολούθησης δεδομένων από δίκτυα αισθητήρων εξ' αποστάσεως σε πραγματικό χρόνο, καθώς και η προσομοίωση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων, έχουν οδηγήσει στην εμφάνιση της έννοιας του ψηφιακού δίδυμου (Digital Twin). Ενώ η τεχνολογία BIM στερείται σημασιολογικής πληρότητας σε τομείς πέρα από το πεδίο της μοντελοποίησης κτιρίων, όπως συστήματα ελέγχου, κτηματολογικά συστήματα, δικτύωση αισθητήρων κλπ, τα Ψηφιακά Δίδυμα στοχεύουν στο να επιτύχουν το συγχρονισμό δεδομένων από διάφορες πηγές και να προσομοιώσουν τον πραγματικό κόσμο σε μία εικονική πλατφόρμα για απρόσκοπτη διαχείριση και έλεγχο της διαδικασίας κατασκευής, διαχείρισης των εγκαταστάσεων, περιβαλλοντικής παρακολούθησης, διαχείρισης και πρόληψης καταστροφών και άλλων διαδικασιών του κύκλου ζωής μιας κατασκευής στο δομημένο περιβάλλον. Τα κτιριακά Ψηφιακά Δίδυμα βρίσκονται ακόμα σε αρχικό στάδιο και ως εκ τούτου απαιτείται μία πιο εις βάθος έρευνα με στόχο τη διερεύνηση και την καθιέρωση των βέλτιστων πρακτικών και τεχνολογιών για την εξυπηρέτηση αυτής της εξέλιξης. Στην υπόψη διπλωματική εργασία προτείνεται μία μεθοδολογία για τη μετάβαση από τον στατικό κόσμο της BIM στον δυναμικό κόσμο των Ψηφιακών Διδύμων. Η πρακτική εφαρμογή γίνεται σε ένα διώροφο «έξυπνο» κτίριο με εγκατεστημένα συστήματα αισθητήρων, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι ένα τέτοιο εγχείρημα μπορεί πράγματι να επιτευχθεί προσφέροντας πολλά οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη.

## Abstract

The recent emergence of the Internet of Things (IoT), the latest technological innovations and the widespread use and embrace of Building Information Models (BIMs) offer several new ideas and decision-making capabilities throughout the life cycle of the built environment. The ability to connect and monitor data from sensor networks remotely in real time as well as the simulation and optimization of engineering systems, have led to the emergence of the Digital Twin (DT) concept of the structured environment. While BIM lacks semantic completeness in areas beyond the scope of building modelling such as control systems, cadastral systems, networking of sensors, meteorological networks, etc., the DTs aim to achieve the synchronization of big data from various sources and simulate the real world into a virtual platform for seamless management and control of the construction process, facility management, environmental monitoring, disaster management and disaster prevention, and other life cycle processes in the built environment. DTs in the built environment are still in nascent stages and thus a more in-depth investigation is required aiming to investigate and establish the best practices and technologies to serve this evolution. Here, a methodology for crossing from the BIM static world to the dynamic cyber-world of DTs is proposed. A practical application is implemented for a two-storey 'smart' building with sensor systems installed in its assets and in the surrounding landscape area. The practical experiment is successfully completed leading to the conclusion that such an endeavour can actually be achieved offering several economic, environmental and social benefits.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	8
2. Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ BUILDING INFORMATION MODELING - BIM .....	10
2.1 Γενικά στοιχεία για την τεχνολογία BIM .....	10
2.2 Επίπεδα σχεδιαστικής λεπτομέρειας .....	13
2.3 Διαστάσεις BIM .....	13
2.4 Επίπεδα ωριμανσης BIM .....	16
2.5 Εφαρμογές της τεχνολογίας BIM .....	18
2.6 Υιοθέτηση της τεχνολογίας BIM σε παγκόσμιο επίπεδο .....	20
2.7 Οφέλη της τεχνολογίας BIM .....	24
2.8 Μειονεκτήματα της τεχνολογίας BIM .....	29
2.9 Μελλοντικές προκλήσεις της τεχνολογίας BIM .....	30
3. Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ DIGITAL TWINS - DTs .....	32
3.1 Γενικά στοιχεία για την τεχνολογία των DTs .....	32
3.2 Βασικές τεχνολογίες που οδήγησαν στα DTs .....	34
3.3 DTs στον κλάδο των κατασκευών .....	36
3.4 Πλεονεκτήματα της χρήσης των DTs στον κλάδο των κατασκευών .....	38
3.5 Έξυπνα κτίρια .....	39
3.6 Έξυπνες πλόλεις .....	41
3.7 Μελλοντικές προοπτικές .....	45
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ BIM ΚΑΙ DTs ΣΕ ΠΙΛΟΤΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ .....	46
4.1 Γενικά στοιχεία του κτιρίου .....	46
4.2 Σχεδιασμός μοντέλου σε BIM .....	47
4.3 Εφαρμογή της τεχνολογίας DTs στο κτιριακό μοντέλο .....	50
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	61
5.1 Συμπεράσματα από τη χρήση της τεχνολογίας BIM .....	61
5.2 Συμπεράσματα από τη χρήση της τεχνολογίας DTs .....	61
Βιβλιογραφία - Αναφορές .....	66



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συνεχώς, όλο και περισσότερες νέες προκλήσεις εμφανίζονται στον διαρκώς αναπτυσσόμενο κλάδο των κτιριακών κατασκευών, ένα κλάδο πολύ σημαντικό για την οικονομία, καθώς αρκεί να αναλογιστούμε πως η οικονομική παραγωγή του ευρωπαϊκού κλάδου των κατασκευών ύψους 1,3 τρις ευρώ αντιπροσωπεύει περίπου το 9% του συνολικού ΑΕΠ της Ευρώπης και ο κλάδος απασχολεί πάνω από 18 εκατομμύρια εργαζομένους (EUBIM Taskbook, 2017). Σε παγκόσμιο επίπεδο μέχρι το 2030 αναμένεται ο κατασκευαστικός κλάδος να αυξηθεί κατά 85% και ο κύκλος εργασιών του να προσεγγίσει τα 15,5 τρις δολάρια, με πρωτοπόρα κράτη την Κίνα, τις ΗΠΑ και την Ινδία (Sun & Liu, 2022). Παρόλα αυτά, πρόκειται για έναν από τους λιγότερο ψηφιοποιημένους τομείς με στάσιμα ή φθίνοντα ποσοστά παραγωγικότητας (Accenture, Demystifying Digitization, 2016), λόγω διάφορων προβλημάτων, τα σημαντικότερα εκ των οποίων σχετίζονται με το μειωμένο βαθμό συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων επαγγελματιών, τις ελλειπείς επενδύσεις στην τεχνολογία και την ανεπαρκή διαχείριση του συνόλου των πληροφοριών.

Με στόχο την άρτια υλοποίηση των έργων υποδομής εμπλέκεται και αλληλεπιδρά ένα σύνολο διάφορων επαγγελματικών ειδικοτήτων που μελετά και σχεδιάζει όχι μόνο τις τεχνικές, αλλά και τις οικονομικές και χρονικές παραμέτρους των έργων αυτών. Το μέλλον των κατασκευών δεν είναι η χρήση πληροφοριών αποσπασματικά ανά οικοδόμημα, αλλά ο συνδυασμός όλων αυτών των πληροφοριών οι οποίες παράγονται και συλλέγονται σε ένα γενικότερο επίπεδο δομημένου περιβάλλοντος. Προς αυτή την κατεύθυνση θα βοηθήσει η μαζικότερη υιοθέτηση της ψηφιοποίησης των έργων υποδομής και η εφαρμογή της υιοθέτησης αυτής κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και σαφές πλαίσιο.

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς η χρήση διάφορων τεχνολογικών εφαρμογών στον κλάδο των κτιριακών κατασκευών. Η υιοθέτηση της μοντελοποίησης κατασκευαστικών πληροφοριών (Building Information Modeling - BIM), ως ένα εργαλείο που συνδυάζει διάφορες εφαρμογές, όπως η απεικόνιση τριών διαστάσεων, η μελέτη του κόστους, η ανάλυση του χρονοδιαγράμματος του έργου κ.α., σηματοδότησε το πέρασμα του κλάδου των κατασκευών στην ψηφιακή





εποχή. Η τεχνολογία BIM εξελίσσεται με την πάροδο των ετών σε μία παγκόσμια γλώσσα για τον κλάδο των κατασκευών, καθιστώντας έτσι εφικτή τη διεύρυνση της συνεργασίας και της διακίνησης δυνατοτήτων πέραν των όποιων συνόρων.

Ένα βήμα παρακάτω στη διαδικασία της ψηφιοποίησης αποτελεί η υιοθέτηση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων (Digital Twins) στις κτιριακές κατασκευές, των οποίων η βασική λειτουργία είναι η αναπαράσταση της φυσικής κατασκευής στον ψηφιακό κόσμο, προσφέροντας παράλληλα υπηρεσίες παρακολούθησης, προσομοίωσης, ανάλυσης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς του κτιρίου σε διαφορετικές συνθήκες εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος, αναλύοντας ένα τεράστιο όγκο δεδομένων μέσω εγκατεστημένων αισθητήρων. Ως αποτέλεσμα της όλης αυτής διαδικασίας δύναται να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του κτιρίου σε διάφορους τομείς, όπως παραδείγματος χάρη η εξοικονόμηση ενέργειας, και να δημιουργηθεί ένα πιο φιλικό περιβάλλον για τους χρήστες.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αναζήτηση των ωφελειών από τη χρήση της τεχνολογίας BIM και της τεχνολογίας των Digital Twins στις κτιριακές κατασκευές και η παρουσίαση της πρακτικής εφαρμογής τους σε ένα διώροφο κτίριο εμβαδού χιλίων επτακοσίων σαράντα έξι τετραγωνικών μέτρων (1.746 m<sup>2</sup>), το οποίο βρίσκεται στο αεροδρόμιο της Λάρισας και χρησιμοποιείται για στέγαση προσωπικού.



## 2. Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ BUILDING INFORMATION MODELING - BIM

### 2.1 Γενικά στοιχεία για την τεχνολογία BIM

Η ιδέα της τεχνολογίας BIM υπάρχει από τη δεκαετία του 1960, όταν Αμερικάνοι ερευνητές είχαν αρχίσει να μιλάνε για μία ενοποιημένη πλατφόρμα που θα συγκεντρώνει όλα τα δεδομένα και τα σχέδια των κατασκευαστικών έργων (Migilinskas, et al, 2013). Το πρώτο ολοκληρωμένο μοντέλο ανήκει στον αρχιτέκτονα Charles Eastman, ο οποίος με την εργασία του «Building Description System» καθιερώθηκε ως ο «πατέρας της BIM», ενώ για πρώτη φορά ο όρος «Building Information Modeling» χρησιμοποιήθηκε από τον Αμερικανό αρχιτέκτονα Phil Bernstein, ο οποίος μετέπειτα διετέλεσε και αντιπρόεδρος της εταιρίας Autodesk.

Η πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια για τη δημιουργία ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή βασισμένου στις αρχές της τεχνολογίας BIM έγινε από την εταιρεία Graphisoft το έτος 1984, στα πλαίσια της έννοιας Virtual Building. Αρχικά ονομάστηκε Radar CH και στη δεύτερη έκδοσή του μετονομάστηκε σε ARCHICAD. Αργότερα, το 2000 πρωτοεμφανίστηκε το Revit, το πιο διαδεδομένο πρόγραμμα BIM των ημερών μας. Το Revit αρχικά ήταν προϊόν της εταιρείας Technology Corporation, ενώ το 2002 αγοράστηκε από την εταιρεία Autodesk και συνεχώς ενημερώνεται, γίνεται πιο εύχρηστο και με πιο φιλικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα να έχει τους περισσότερους χρήστες αυτή τη στιγμή σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ο προτεινόμενος ορισμός της Διεθνούς Επιτροπής Προτύπων BIM (National BIM Standards Committee - NBIMS), ορίζει το Building Information Modeling ως «μία ολοκληρωμένη ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας υποδομής. Ένα μοντέλο BIM αποτελεί μία πηγή πληροφοριών για ένα κτίριο - υποδομή, δημιουργώντας έτσι μία αξιόπιστη βάση για τη λήψη βελτιωμένων αποφάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής του, η οποία είναι διαθέσιμη από τα πιο πρώιμα στάδια της σχεδιαστικής του σύλληψης έως την κατεδάφιση».



Σύμφωνα με το Ερευνητικό Ίδρυμα του Ηνωμένου Βασιλείου «BRE», το BIM ορίζεται ως μία αξία που χρησιμεύει σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός στοιχείου και αυτό υποστηρίζεται από τη δημιουργία, επεξεργασία και ανταλλαγή «έξυπνων» δεδομένων και 3D μοντέλων που συνδέονται μεταξύ τους. Με επίκεντρο αυτή την ψηφιακή βάση δεδομένων που αναπαριστά το κτίριο σε κάθε του στάδιο, μπορούμε να διαχειριστούμε τα δεδομένα και να οργανώσουμε τον οικονομικό και χρονικό προγραμματισμό ενός έργου, όπως και να πραγματοποιήσουμε την ενεργειακή ανάλυση του κτιρίου.

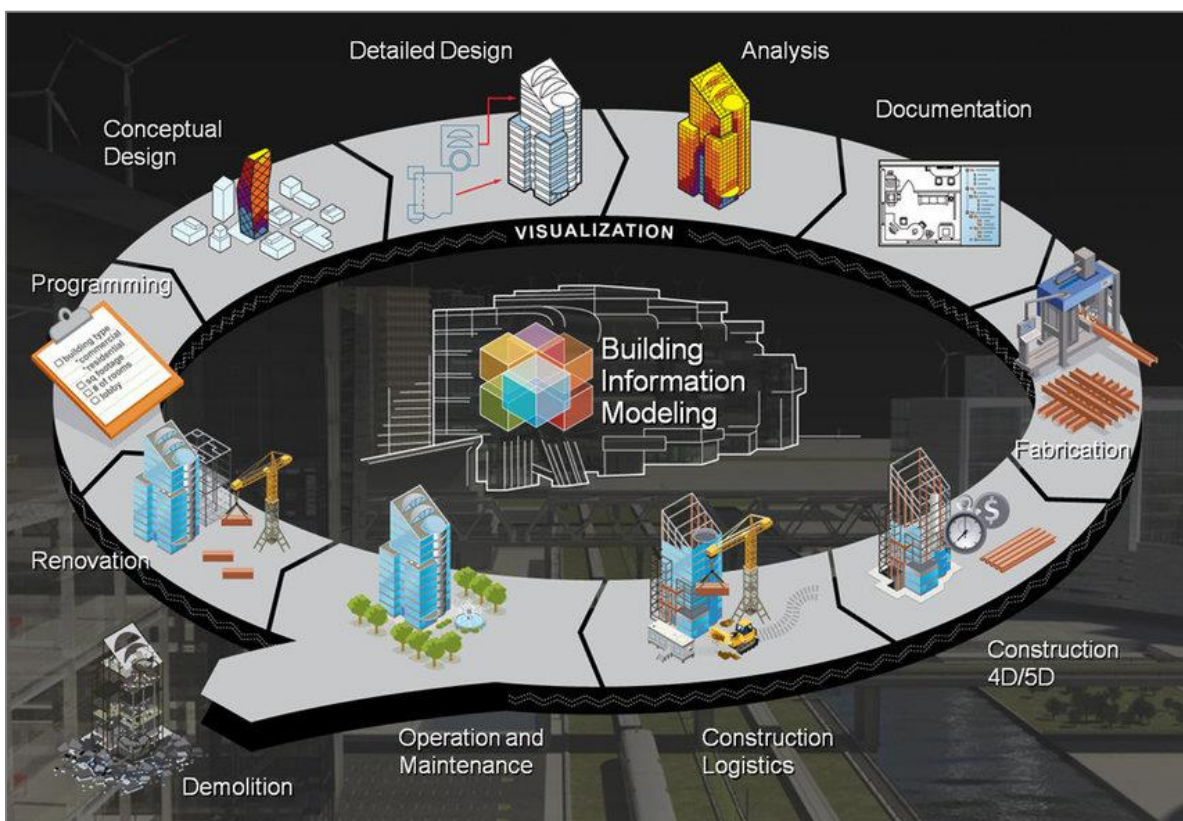
Στην Ελλάδα ο όρος BIM έχει αποδοθεί ως «Μοντελοποίηση Κατασκευαστικών Πληροφοριών», όπως διαβάζουμε και στην ελληνική έκδοση του σχετικού εγχειριδίου της ΕΕ για την υιοθέτηση της μοντελοποίησης κατασκευαστικών πληροφοριών από τον ευρωπαϊκό δημόσιο τομέα (EUBIM Taskbook, 2017).

Με τη χρήση της τεχνολογίας BIM, μπορούν να συνδεθούν, αποθηκευτούν και επαναχρησιμοποιηθούν πληροφορίες των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων συγκεκριμένων δομικών στοιχείων, σε ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο. Η BIM αποτελεί ουσιαστικά μία οπτικοποιημένη βάση δεδομένων και ένα μοντέλο πληροφοριών της κατασκευής που μπορεί να ενισχύσει τη συνεργασία καθώς χρησιμοποιείται παράλληλα από όλους τους εμπλεκόμενους του έργου. Είναι πλέον εμφανής η ανάγκη για μία θεμελιώδη αλλαγή από τον παραδοσιακό τρόπο εμπλοκής όλων των συμμετεχόντων στο έργο, που δουλεύουν σε ξεχωριστές ομάδες και με διαφορετικές και πολλές φορές μη συμβατές τεχνολογίες λογισμικού, σε μία ενοποιημένη πλατφόρμα (Smith, 2014). Η χρήση της BIM επιτρέπει στην ομάδα του έργου να ανταλλάσσει άμεσα όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το έργο και διευκολύνει έτσι τη λήψη των αποφάσεων.

Η BIM χρησιμεύει, πέρα από την απόδοση του έργου μέσω ενός ψηφιακού μοντέλου, και στη γενικότερη διαχείριση της κτιριακής κατασκευής σε όλο τον κύκλο ζωής της, καθώς η BIM εφαρμόζεται τόσο στη διαδικασία σχεδιασμού ενός έργου, όσο και στη διαδικασία κατασκευής και συντήρησής του. Βασίζεται στην ύπαρξη αποθηκευμένων παραμετρικών στοιχείων σε βιβλιοθήκες αντικειμένων, τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιούνται τόσο στο ίδιο, όσο και σε μελλοντικά έργα, και εμπεριέχουν γεωμετρικά, τοπολογικά και σημασιολογικά χαρακτηριστικά.

Αυτή είναι η βασική λειτουργία της BIM, η διαχείριση δηλαδή αρχικά των πληροφοριών και έπειτα η αναπαράσταση αυτών σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον.

Ο σκοπός της BIM είναι να επιτευχθούν πολλά σε όλους τους τομείς του έργου, με την προϋπόθεση ότι θα χρησιμοποιηθούν λιγότερα (doing more, with less). Το πεδίο εφαρμογής της δεν περιορίζεται στο σχεδιασμό και στη μελέτη, αλλά επεκτείνεται και υποστηρίζει υπηρεσίες όπως τη διαχείριση του κόστους (cost management) και τη διαχείριση διάφορων λειτουργιών (operations management). Ως αποτέλεσμα αυτού είναι να προκύπτει ένα πλήθος πληροφοριών που είναι συυφασμένες με το δομημένο αποτέλεσμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μελλοντική χρήση (Φαρμάκης, 2019). Στην Εικόνα 1 φαίνονται συνοπτικά οι δυνατότητες της BIM στον κύκλο ζωής ενός έργου.



Εικόνα 1. Δυνατότητες BIM στον κύκλο ζωής ενός έργου (Πηγή: <http://buildipedia.com/>)

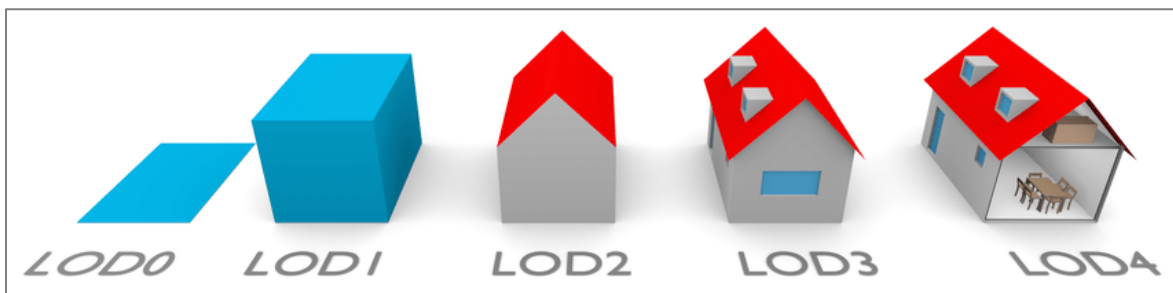


## 2.2 Επίπεδα σχεδιαστικής λεπτομέρειας

Τα επίπεδα σχεδιαστικής λεπτομέρειας (Level Of Detail) της BIM είναι τα ακόλουθα:

- LOD0, όπου φαίνεται μόνο το αποτύπωμα του κτιρίου.
- LOD1, όπου φαίνεται σε γενικές γραμμές ο όγκος του κτιρίου σε 2,5D.
- LOD2, όπου φαίνονται λίγο περισσότερες εξωτερικές λεπτομέρειες του κτιρίου, κυρίως όσον αφορά τη μορφή αυτού.
- LOD3, όπου φαίνονται όλες οι διαθέσιμες εξωτερικές λεπτομέρειες του κτιρίου, όπως στέγη, ανοίγματα, υλικά κατασκευής κλπ.
- LOD4, όπου φαίνονται και εσωτερικές λεπτομέρειες του κτιρίου.

Σχηματικά, τα ανωτέρω επίπεδα λεπτομέρειας αποτυπώνονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Επίπεδα σχεδιαστικής λεπτομέρειας BIM (Πηγή: <http://buildipedia.com/>)

## 2.3 Διαστάσεις BIM

Τα διάφορα είδη των δεδομένων της BIM συνδέονται με το μοντέλο μέσω των διαστάσεων αυτού. Μέσω αυτών των διαστάσεων παρέχονται οι διάφορες πληροφορίες για τα τεχνικά, γεωμετρικά, οικονομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός έργου. Οι συγκεκριμένες διαστάσεις, που δεν θα πρέπει να



συγχέονται με τις φυσικές διαστάσεις, συμβολίζονται από το γράμμα D, από το Dimension, και στη συνέχεια μία ακολουθία φυσικών αριθμών μεγαλύτερων από το 3. Οι εν λόγω διαστάσεις αναλύονται ως κάτωθι:

- 3D

Η διάσταση αυτή σχετίζεται με τα ορατά στοιχεία του έργου και πιο συγκεκριμένα σχετίζεται με τη γεωμετρία της κατασκευής στις τρεις φυσικές της διαστάσεις (μήκος, πλάτος, ύψος). Έτσι, με τη βοήθεια αυτής της διάστασης απεικονίζεται το έργο, επιβοηθείται η λήψη ορθών αποφάσεων και αποφεύγονται οι επικαλύψεις των εργασιών, ενώ στη βελτιωμένη απεικόνιση η διάσταση αυτή εμπεριέχει λεπτομέρειες για τα αντικείμενα του έργου όπως η υφή, το χρώμα, η σύσταση, κλπ.

- 4D

Η 4η διάσταση προσθέτει και τη διάσταση του χρόνου στις προηγούμενες τρεις και χρησιμοποιείται για όλες τις διαδικασίες που συνδέονται με το χρονοδιάγραμμα και τον προγραμματισμό του έργου. Καθιστά δυνατή την οπτικοποίηση των διάφορων ενεργειών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου καθώς και τον έλεγχο αυτών. Οι πληροφορίες που αποθηκεύονται στη διάσταση αυτή έχουν να κάνουν με το χρόνο διεξαγωγής διάφορων δραστηριοτήτων, τη χρονική τους επικάλυψη, την εξάρτηση μεταξύ τους, τη χρονική στιγμή κατασκευής τμημάτων του έργου, και τη χρονική αλληλουχία όλων των γεγονότων. Μέσω της 4ης διάστασης του BIM απεικονίζεται οπτικά η αλληλουχία όλων των συμβάντων ενός έργου σαν μια χρονική σειρά γεγονότων, και έτσι μπορούν όλοι οι συμμετέχοντες να σχεδιάσουν τις διάφορες δραστηριότητες, να τις προτεραιοποιήσουν, να διαχειριστούν τις όποιες πιθανές λύσεις, ώστε τελικά να έχουν καλύτερα αποτελέσματα και να παρακολουθούν την εξέλιξη και την πορεία των συμβάντων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου.

- 5D

Η 5η διάσταση προσθέτει στις προηγούμενες και την παράμετρο του κόστους ενός έργου. Η 5η διάσταση έχει να κάνει με την παρακολούθηση του προϋπολογισμού ενός έργου και τη γενικότερη ανάλυση του κόστους, το οποίο



αφορά αρχικά τόσο το κόστος αγοράς και εγκατάστασης, όσο και έπειτα το κόστος λειτουργίας και ενδεχόμενης μελλοντικής επισκευής/αντικατάστασης κάποιου στοιχείου του έργου. Μέσω της εν λόγω διάστασης δύναται να πραγματοποιηθούν αλλαγές στον εξοπλισμό, στα υλικά, στο απαιτούμενο ανθρώπινο δυναμικό, και αυτόματα να υπολογιστούν οι οικονομικές επιπτώσεις, ενώ παράλληλα θα ενημερωθούν όλοι οι συμμετέχοντες στο έργο.

- 6D

Η 6η διάσταση εισάγει την παράμετρο του ελέγχου της ενεργειακής απόδοσης καθόλη τη διάρκεια σχεδιασμού και λειτουργίας του έργου. Στη διάσταση αυτή εισάγονται και αποθηκεύονται διάφορες πληροφορίες στα δομικά στοιχεία του τρισδιάστατου μοντέλου, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ενεργειακές αναλύσεις. Κατ' αυτόν τον τρόπο δύναται να βελτιστοποιηθεί το ενεργειακό αποτύπωμα του κτιρίου.

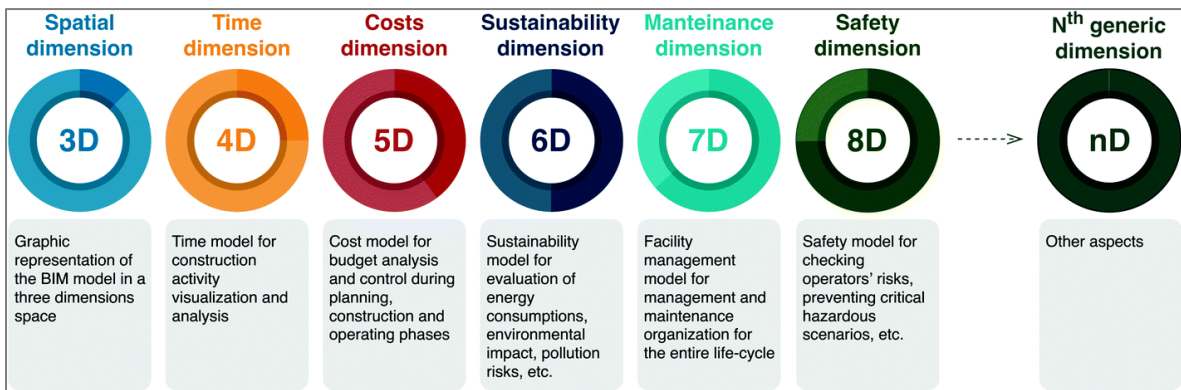
- 7D

Η 7η διάσταση χρησιμοποιείται ως μοντέλο δεδομένων για τη συντήρηση και τη λειτουργία των κτιριακών εγκαταστάσεων. Εισάγονται πληροφορίες σχετικά με τα υλικά του κτιρίου, τους κατασκευαστές των διάφορων στοιχείων, τις ημερομηνίες εγκατάστασης, τις λεπτομέρειες ρύθμισης και λειτουργίας τους, τις απαιτούμενες προγραμματισμένες συντηρήσεις τους κλπ.

- 8D

Η 8η διάσταση σχετίζεται με τη διαχείριση και την πρόληψη πιθανών κινδύνων στα έργα. Η ασφάλεια και η υγεία αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο στα κατασκευαστικά έργα και μέσω της εν λόγω διάστασης μελετώνται όλες οι απαιτούμενες ενέργειες ώστε να εξαλειφθούν τα πιθανά ατυχήματα.

Σχηματικά, οι ανωτέρω διαστάσεις αποτυπώνονται στην Εικόνα 3.

Εικόνα 3. Διαστάσεις BIM (Πηγή: <http://link.springer.com/>)

## 2.4 Επίπεδα ωρίμανσης BIM

Το 2011 η κυβερνητική ομάδα που συστάθηκε για τη μελέτη εφαρμογής της τεχνολογίας BIM στο Ηνωμένο Βασίλειο ανέπτυξε ένα μοντέλο ωρίμανσης (maturity model), το οποίο έγινε ευρέως αποδεκτό στον κατασκευαστικό κλάδο (Wang et al, 2019). Αυτά τα επίπεδα ωρίμανσης αναφέρονται στην έκταση της χρήσης της BIM κατά τη διαδικασία εκτέλεσης κάποιας εργασίας και αναλύονται κάτωθι:

### - Επίπεδο 0

Στο επίπεδο αυτό γίνεται χρήση αποκλειστικά δισδιάστατων αρχείων CAD για τη σχεδίαση και το κάθε μέλος της ομάδας εργάζεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Αποτελεί έναν αρκετά απαρχειωμένο τρόπο και στην ουσία αυτό το επίπεδο δεν είναι μέρος της τεχνολογίας BIM.

### - Επίπεδο 1

Στο επίπεδο αυτό χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα δεδομένα σχεδίασης και κάθε μελετητής εργάζεται αυτόνομα. Επειδή οι μελετητές δεν συνεργάζονται μεταξύ τους, αυτό το επίπεδο αποκαλείται συχνά και ως μοναχικό (lonely) BIM. Κάποια πακέτα δεδομένων για τη διαχείριση του κόστους δύναται επίσης να χρησιμοποιηθούν επιπρόσθετα σ' αυτό το επίπεδο, χωρίς όμως να ενσωματώνονται στο ευρύτερο μοντέλο BIM.





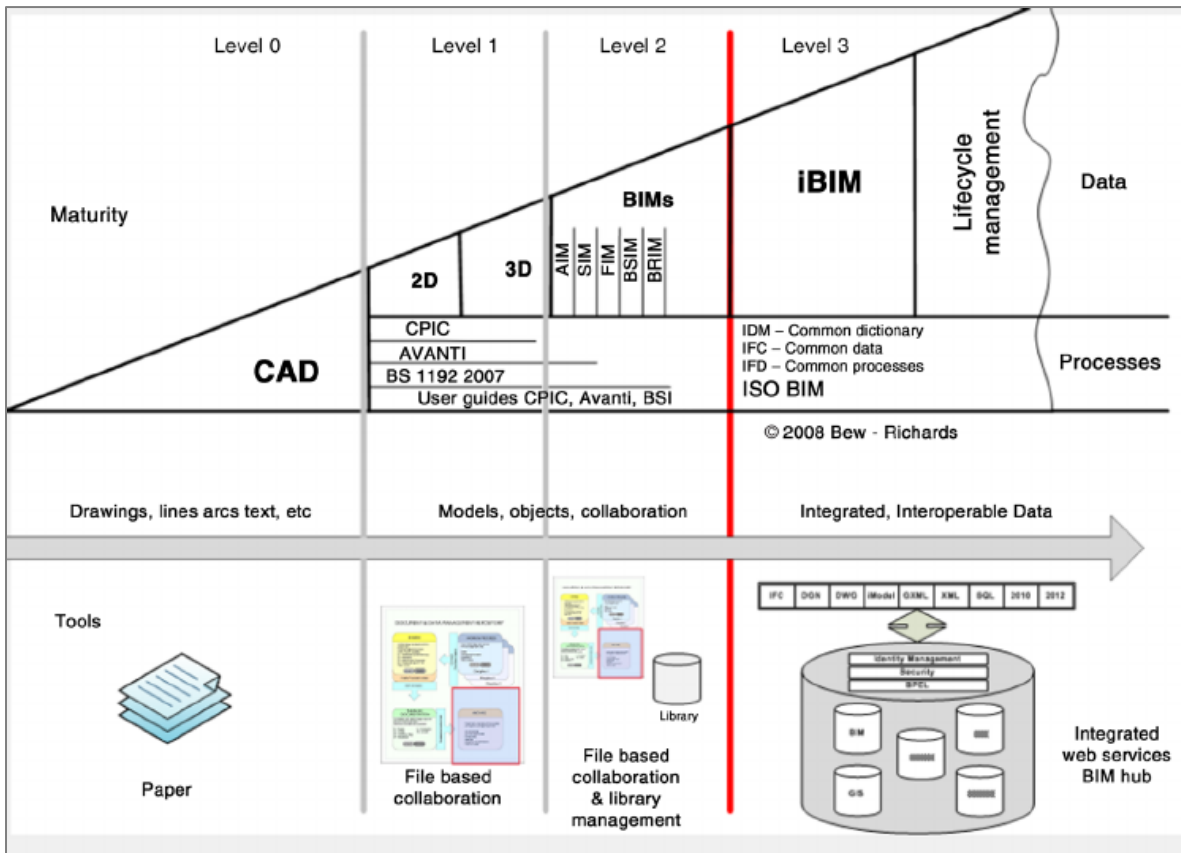
- Επίπεδο 2

Στο επίπεδο αυτό εφαρμόζονται τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας BIM, υπάρχει αλληλεπίδραση και συνεργασία μεταξύ των μελετητών και χρήση κοινού τύπου αρχείων ώστε να διευκολύνεται ο διαμοιρασμός των πληροφοριών. Υπάρχει δηλαδή ένα ενοποιημένο μοντέλο το οποίο συγκεντρώνει τις πληροφορίες των επιμέρους μοντέλων που ενημερώνονται από τον κάθε μελετητή. Έτσι εποπτεύεται καλύτερα το σύνολο του έργου, καθώς ο κάθε μελετητής μπορεί να ενημερώνεται χωρίς μεγάλη χρονοτριβή για το τι συμβαίνει στα υπόλοιπα τμήματα του έργου. Το συγκεκριμένο επίπεδο έχει καθιερωθεί σε όλα τα δημόσια έργα του Ηνωμένου Βασιλείου από το 2016.

- Επίπεδο 3

Στο επίπεδο αυτό εφαρμόζεται ένα ολοκληρωμένο συνεργατικό μοντέλο που ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο, καθώς ο σχεδιασμός του έργου γίνεται πάνω σε μία κοινή πλατφόρμα. Στο συγκεκριμένο επίπεδο χρησιμοποιείται ένα σύνολο πληροφοριών που έχουν να κάνουν με τη χρονική αλληλουχία των εργασιών, τα διάφορα κόστη, πληροφορίες για τη συντήρηση των διαφόρων μερών του έργου, τους κατασκευαστές τους, κλπ.

Σχηματικά, τα τέσσερα επίπεδα ωρίμανσης της τεχνολογίας BIM με τα χαρακτηριστικά τους, φαίνονται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4. Επίπεδα ωρίμανσης BIM (Hardi et al, 2015)

## 2.5 Εφαρμογές της τεχνολογίας BIM

Κάτωθι παρουσιάζονται δύο εφαρμογές της τεχνολογίας BIM, ή πιο συγκεκριμένα δύο μελέτες περίπτωσης (case studies), όπως αυτές αναλύονται στο Azhar, 2011:

### *Aquarium Hilton Garden Inn. Atlanta, Georgia*

Το συγκεκριμένο συγκρότημα είναι ένα κτίριο 14 ορόφων με ξενοδοχείο, καταστήματα, και χώρους στάθμευσης αυτοκινήτων με τα κάτωθι συνοπτικά στοιχεία:

- Κόστος έργου: 46.000.000 \$
- Πεδία εφαρμογής BIM: Συντονισμός μελετών, ανίχνευση μη συμβατών μερών, έλεγχος της αλληλουχίας των δραστηριοτήτων, χρονικός



προγραμματισμός.

- Κόστος εφαρμογής BIM: 90.000 \$ (0,2% του προϋπολογισμού του έργου).
- Όφελος ως προς το κόστος: 1.000.000 \$, που αποδίδεται κυρίως στην έγκαιρη ανίχνευση και επίλυση προβλημάτων μη συμβατότητας τμημάτων των μελετών.
- Όφελος ως προς το χρόνο απασχόλησης: 1.143 λιγότερες ανθρωποώρες.

Το εν λόγω έργο δεν μελετήθηκε εξ αρχής χρησιμοποιώντας τεχνολογία BIM, παρά μόνο στο στάδιο συντονισμού των μελετών για την ανίχνευση ασυμβατοτήτων. Το πρόγραμμα αρχικά ανίχνευσε 55 ασυμβατότητες οι οποίες υπολογίστηκε ότι θα κόστιζαν 124.000 \$ και κατά την ανασκόπηση των συμβατικών τευχών του έργου εντοπίστηκαν επιπλέον 590 ασυμβατότητες, με αποτέλεσμα να αποφευχθεί δαπάνη της τάξης των 800.000 \$, και επιπλέον δαπάνη από τις λιγότερες ανθρωποώρες εργασίας.

Συμπερασματικά λοιπόν, με την εφαρμογή της τεχνολογίας BIM στο Aquarium Hilton Garden Inn αναδείχτηκαν ορισμένα από τα οικονομικά οφέλη που προέκυψαν μέσω της οπτικοποίησης, της ανάλυσης και της ανίχνευσης των ασυμβατοτήτων των μελετών.

### *Dubai Mall*

Το Dubai Mall είναι το μεγαλύτερο εμπορικό κέντρο στον κόσμο, με συνολική έκταση 12 εκατομμύρια τετραγωνικά πόδια, από τα οποία τα 9 εκατομμύρια λειτουργούν ως εμπορικός χώρος. Συνοπτικά τα στοιχεία του έργου έχουν ως κάτωθι:

- Κόστος έργου: 1.3 δισεκατομμύρια \$
- Πεδία εφαρμογής της BIM: Μελέτη και κατασκευή.



- Όφελος ως προς το κόστος: 20.000.000 \$.
- Όφελος ως προς το χρόνο απασχόλησης: 504.000 λιγότερες ανθρωποώρες.

Λόγω του τεράστιου όγκου εργασιών αλλά και της πολυπλοκότητας της κατασκευής, τα πιθανά λάθη στις προμετρήσεις των ποσοτήτων των υλικών θα είχαν τεράστιες επιπτώσεις στο κόστος καθώς και στο χρόνο παράδοσης του έργου. Με τις συμβατικές μεθόδους ο όγκος υπολογισμών θα ήταν δύσκολα διαχειρίσιμος καθώς υπήρχαν 32.000 σελίδες υπολογισμών σε λογιστικά φύλλα (spreadsheet) κάθε ένα μήνα, δηλαδή 1.152.000 φύλλα κατά τη συνολική διάρκεια της κατασκευής. Χωρίς λοιπόν τη χρήση μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας, ο κίνδυνος λαθών θα ήταν πολύ μεγάλος.

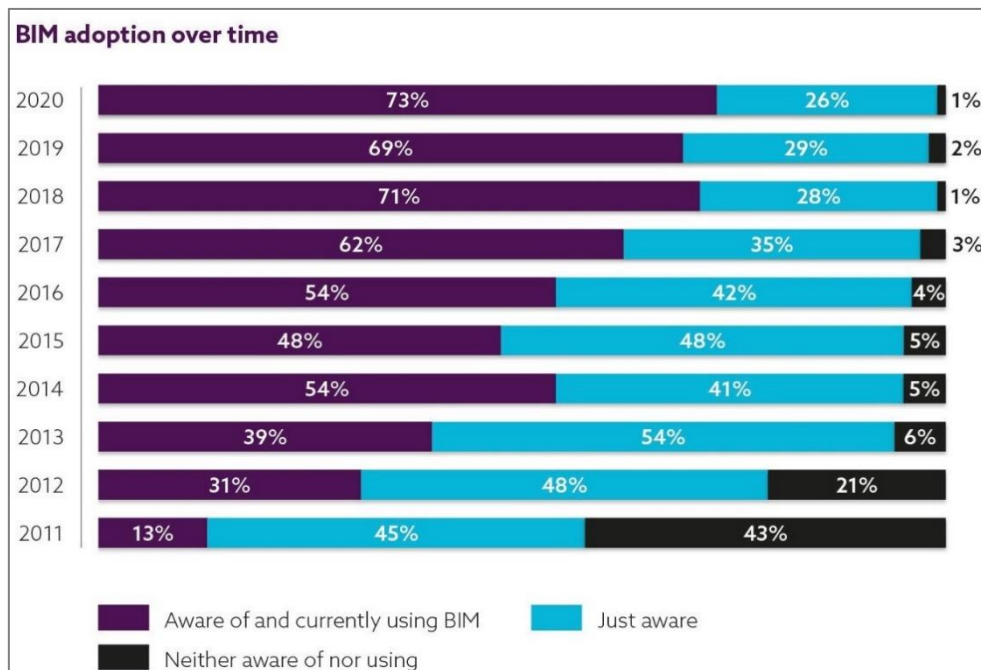
Τα οφέλη της ενσωμάτωσης της BIM στο έργο ήταν πολλαπλά, καθώς μέσω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας μειώθηκαν τα λάθη στις προμετρήσεις των υλικών από τον ανθρώπινο παράγοντα, το μοντέλο BIM βοήθησε στην οπτικοποίηση των σύνθετων τμημάτων του έργου βοηθώντας στον συντονισμό των εργασιών και μειώθηκαν οι απαιτήσεις σε ανθρώπινο δυναμικό. Τα οφέλη αυτά υπολογίζονται περίπου σε μείωση του κόστους κατά 20 εκατομμύρια δολάρια.

## 2.6 Υιοθέτηση της τεχνολογίας BIM σε παγκόσμιο επίπεδο

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία BIM εξαπλώνεται σταδιακά σε παγκόσμιο επίπεδο. Η υιοθέτησή της όμως δεν βρίσκεται στα ίδια επίπεδα σε όλες τις χώρες. Η κάθε χώρα έθεσε τους δικούς της κανονισμούς, προϋποθέσεις και διαδικασίες, ανάλογα τόσο με την ωριμότητα των χρηστών που βρίσκονται στην επικράτειά της, όσο και με τις ανάγκες του κατασκευαστικού της κλάδου.

Πρωτοπόρα στην υιοθέτηση της BIM είναι η Μεγάλη Βρετανία. Σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση της National BIM Standard (NSB) του Ηνωμένου Βασιλείου, το 2011 το 43% όσων ερωτήθηκαν δεν είχαν ακούσει για την τεχνολογία BIM, ενώ

σήμερα είναι σχεδόν καθολική η ευαισθητοποίηση με ένα ποσοστό 73% να χρησιμοποιεί ενεργά την εν λόγω τεχνολογία. Η εξέλιξη της υιοθέτησης της BIM την τελευταία δεκαετία φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Υιοθέτηση BIM (UK NBS)

Σε θεσμικό επίπεδο, θεσπίστηκε το 2011 από την κυβέρνηση της Μεγάλης Βρετανίας ως υποχρεωτική η εφαρμογή της τεχνολογίας BIM σε επίπεδο 2 σε όλα τα δημόσια έργα με έναρξη ισχύος της εν λόγω διάταξης τον Απρίλιο του 2016. Αυτό έδωσε την αφορμή για ευρύτερη διάδοση της BIM και περισσότερες ευκαιρίες για συνεργασία μεταξύ των δημόσιων έργων και της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Επιπρόσθετα ανακοινώθηκε ότι από το έτος 2025 η εκτέλεση δημοσίων έργων θα απαιτεί την οργάνωση της BIM σε επίπεδο 3. Κατ' αυτόν τον τρόπο έγινε σαφές στις μεγάλες εταιρίες του κλάδου ότι θα πρέπει να προσαρμοστούν και να εκπαιδεύσουν το προσωπικό τους ώστε να διεκδικούν πλέον μερίδιο των δημοσίων κατασκευαστικών έργων. Αρωγός προς αυτή την κατεύθυνση υπήρξε και η σύσταση της UK BIM Alliance, η οποία παρείχε ενημέρωση και βοήθεια στις ενδιαφερόμενες εταιρίες.

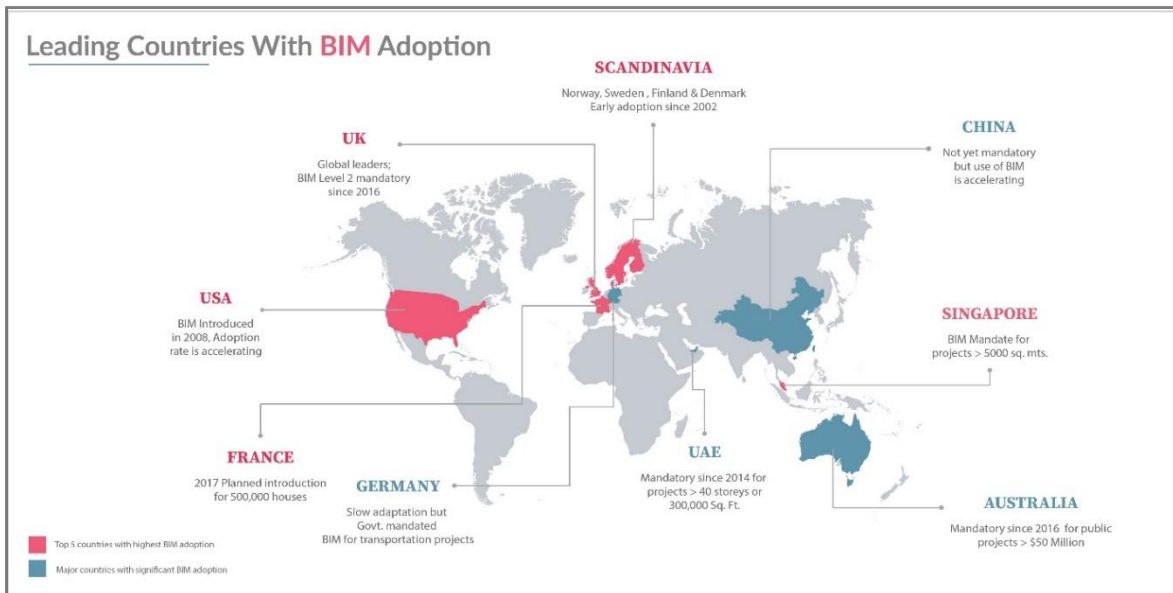
Η έκδοση μιας σειράς κανονιστικών οδηγιών όπως οι Publicly Available Specifications - PAS 1192-2 & 3, οι οποίες κυκλοφόρησαν το 2013, έθεσαν τις



απαραίτητες προδιαγραφές για τη συντονισμένη εφαρμογή ενός πλαισίου BIM επιπέδου 2, και έπειτα εμπλουτίστηκαν και μετεξελίχθηκαν στο BS EN ISO 19650, αποτελώντας πλέον μία διεθνή προδιαγραφή και παρέχοντας ένα ενιαίο πλαίσιο προς τη δημιουργία μοντελοποίησης κατασκευαστικών πληροφοριών σε ολόκληρο τον κόσμο. Η όλη τεχνογνωσία που αποκτήθηκε από τη Μεγάλη Βρετανία αποτελεί πλέον ένα προϊόν συμβουλευτικής παγκοσμίως. Το Centre for Digital Britain στο Cambridge (CDBB) είναι ένα παγκόσμιας εμβέλειας κέντρο, στο οποίο παράγεται έρευνα που υποστηρίζει την κατασκευαστική βιομηχανία και μελετά έμπρακτα κάποια παραδείγματα με στόχο να κατανοήσει καλύτερα τον τρόπο εκτέλεσης έργων και να υποστηρίξει ψηφιακές λύσεις για το σχεδιασμό, την εκτέλεση και την ένταξη τους μέσα στο δομημένο περιβάλλον. Επίσης, το Μάιο του 2021 ανακοινώθηκε από το CDBB η υπογραφή μνημονίου συνεργασίας μεταξύ του Ηνωμένου Βασιλείου και των ΗΠΑ, με στόχο να προωθηθεί από κοινού η έρευνα για την υιοθέτηση των ψηφιακών τεχνολογιών στη γενικότερη βελτίωση του δομημένου περιβάλλοντος.

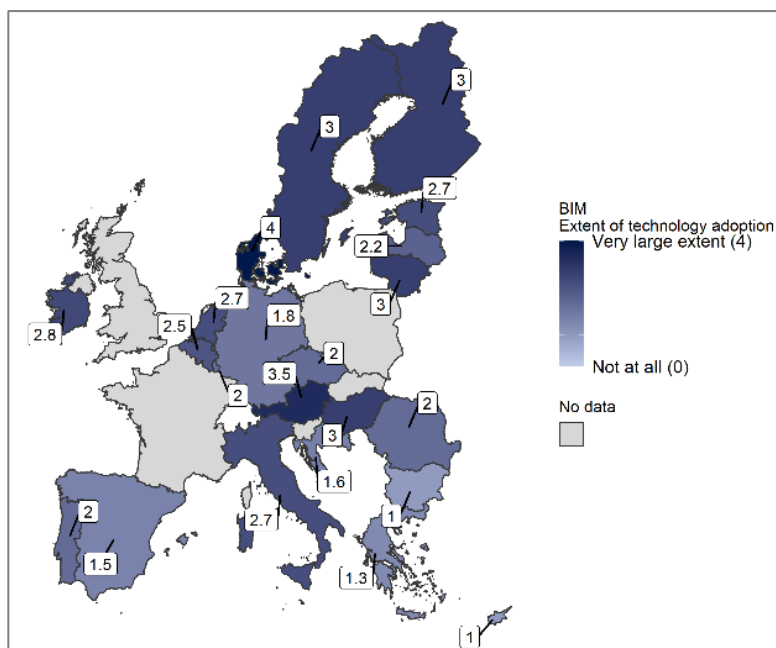
Σε παράλληλη γραμμή πλεύσης με τη Μεγάλη Βρετανία κινείται και η Σιγκαπούρη, μία χώρα που καθώς βρίσκεται στην αιχμή της πρωτοπορίας και της επιχειρηματικότητας, διέγνωσε από νωρίς όλα τα οφέλη της BIM στον κατασκευαστικό τομέα και η εφαρμογή της στα δημόσια έργα άρχισε από το 2010. Ήδη από το 2015 ισχύει η πλήρης υιοθέτησή της BIM σε όλα τα δημόσια έργα. Στόχος της Σιγκαπούρης είναι να καταστεί το πρώτο έξυπνο έθνος και αποτελεί πλέον παγκόσμιο κέντρο ψηφιακών τεχνολογιών και έρευνας για το δομημένο περιβάλλον.

Τον κατάλογο των πέντε χωρών με το μεγαλύτερο ποσοστό υιοθέτησης της BIM παγκοσμίως μετά από τη Μεγάλη Βρετανία και τη Σιγκαπούρη, συμπληρώνουν τα Σκανδιναβικά κράτη, οι ΗΠΑ και η Γαλλία, ενώ ακολουθούν η Αυστραλία, η Κίνα, η Γερμανία και τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Στον ακόλουθο χάρτη της Εικόνας 6 φαίνονται οι χώρες που πρωτοστατούν στην υιοθέτηση της BIM σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε από την United-BIM Inc.



Εικόνα 6. Χώρες που πρωτοστατούν στην υιοθέτηση της BIM (United-BIM Inc)

Όσον αφορά στην Ευρώπη, σύμφωνα με έρευνα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και ειδικότερα του Ευρωπαϊκού Παρατηρητηρίου Κατασκευών και του European Cyber Security Organisation (ECSO) που δημοσιεύτηκε τον Απρίλιο του 2021, το 29% των κατασκευαστικών εταιριών χρησιμοποιεί την τεχνολογία BIM 3D στη μελέτη και την εκτέλεση έργων, ενώ το ποσοστό μειώνεται μόλις σε 6% για την τεχνολογία BIM 4D. Η υιοθέτηση στις ευρωπαϊκές χώρες φαίνεται στην Εικόνα 7, όπου παρατηρούμε και την πολύ χαμηλή θέση της Ελλάδας, καθώς μόλις τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία της BIM αποκτά σιγά σιγά έδαφος, με την Γραμμή 4 της Απτικό ΜΕΤΡΟ να αποτελεί το μεγαλύτερο δημόσιο έργο το οποίο έχει σχεδιαστεί εξαρχής με την τεχνολογία της BIM.



Εικόνα 7. Υιοθέτηση της BIM στην Ευρώπη (ECSSO Survey, 2020)

## 2.7 Οφέλη της τεχνολογίας BIM

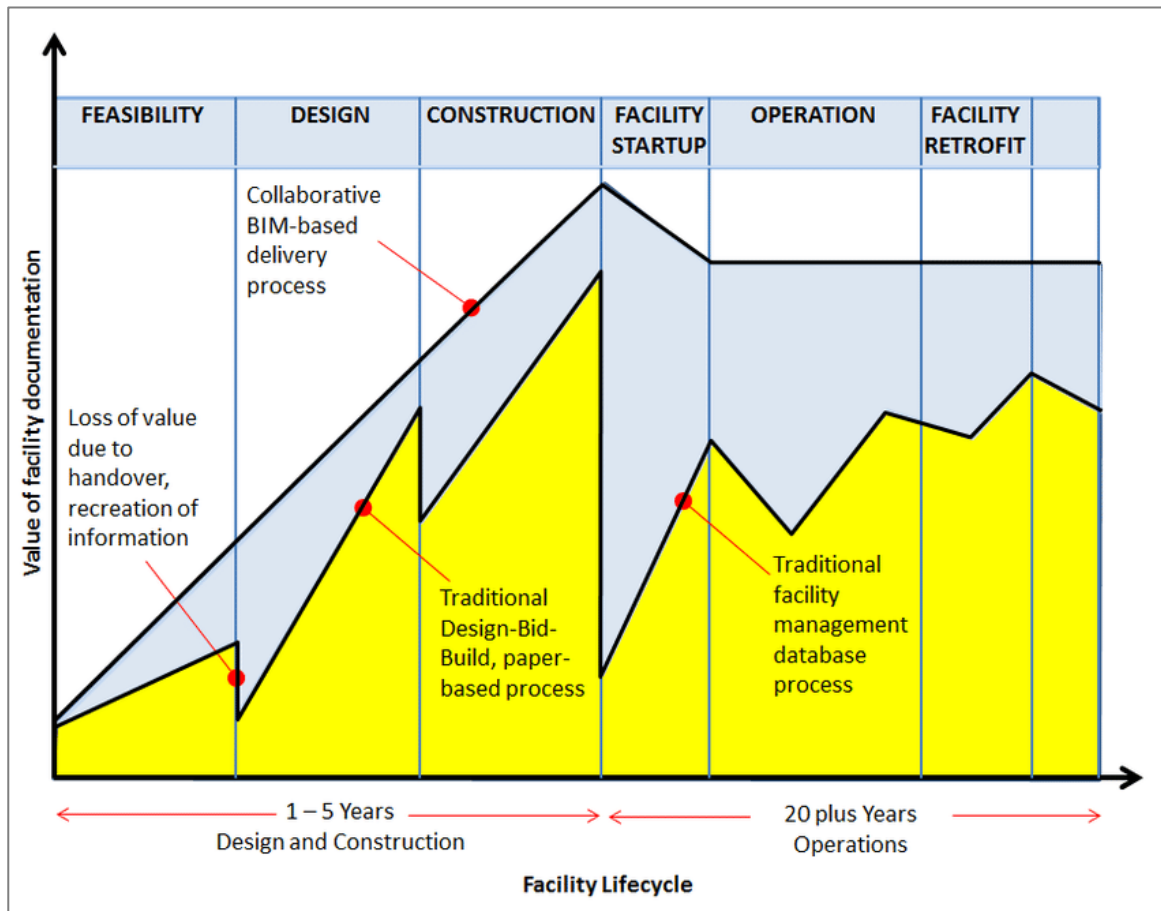
Η συνεισφορά της τεχνολογίας BIM στον κατασκευαστικό κλάδο συναντάται σε διάφορους τομείς, ως κάτωθι:

### - Δομημένη πληροφορία

Στις διάφορες φάσεις του έργου παράγεται αρκετά μεγάλος όγκος πληροφοριών από όλους τους συντελεστές, με τον κίνδυνο της απώλειάς τους και της μη αξιοποίησής τους. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία BIM, όλη αυτή η κατακερματισμένη πληροφορία που προκύπτει συλλέγεται και δομείται οργανωμένα. Η ψηφιακή βάση δεδομένων όλων αυτών των πληροφοριών διευκολύνει την ενημέρωση και την όλη διαχείρισή τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μελλοντικά έργα, ενώ μειώνονται ταυτόχρονα οι χρόνοι για τις εγκρίσεις και τις άδειες από τους χρήστες ή τις όποιες κανονιστικές αρχές καθώς οι πληροφορίες είναι πιο γρήγορα αλλά και πιο εύκολα προσβάσιμες. Με τη χρήση της BIM κατά τη διάρκεια του έργου αποφεύγεται επίσης η απώλεια πληροφοριών (Perez-Sanchez et al, 2017). Στην Εικόνα 8 φαίνεται η απώλεια δεδομένων από στάδιο σε στάδιο του έργου



σύμφωνα με τη μελέτη στο Panaitescu, 2014.



Εικόνα 8. Απώλεια δεδομένων από στάδιο σε στάδιο του έργου κατά την παραδοσιακή διαδικασία (Panaitescu, 2014)

#### - Βελτιωμένη απεικόνιση

Οι τελικοί χρήστες συνήθως δεν έχουν γνώσεις σχεδίου, οπότε η παρουσίαση της πρότασης σε δισδιάστατη μορφή δεν γίνεται εύκολα κατανοητή, ειδικά όταν πρόκειται για κάποια πολύπλοκη εγκατάσταση. Η τρισδιάστατη απεικόνιση βοηθάει στην πληρέστερη κατανόηση του έργου, καθώς ο μέσος χρήστης έχει συνηθίσει να βλέπει και να αντιλαμβάνεται τρισδιάστατα αντικείμενα στην καθημερινή του ζωή. Το τρισδιάστατο μοντέλο μας επιτρέπει να έχουμε τη συνολική εικόνα του αποτελέσματος, χρησιμοποιώντας εργαλεία προσομοίωσης και φωτορεαλισμούς. Λόγω της βάσης δεδομένων που δημιουργείται στη BIM, παρέχεται η δυνατότητα της ακριβούς αναπαράστασης της κατασκευής σε όλες τις φάσεις σχεδιασμού του έργου, όπως και πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του και τη λειτουργία του. Επιπλέον, δύναται η δυνατότητα για τη διερεύνηση διάφορων λύσεων στις

αποφάσεις που θα πρέπει να παρθούν, χωρίς σπατάλη χρόνου. Έτσι λοιπόν είναι εφικτή τόσο η καλύτερη κατανόηση του έργου, όσο η δυνατότητα άμεσης αλλαγής κάποιων εργασιών. Στην Εικόνα 9 φαίνεται η μετάβαση από δισδιάστατα σχέδια CAD σε τρισδιάστατα σχέδια BIM.



Εικόνα 9. Από τα σχέδια CAD στα σχέδια BIM (Πηγή: <https://www.cadtobim.com/>)

- Αύξηση της συνεργατικότητας

Η επικοινωνία των εμπλεκομένων είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα κατά τη μελέτη και την κατασκευή ενός έργου. Με τη χρήση όμως της τεχνολογίας BIM μπορούν όλοι να εργάζονται πάνω στο ίδιο μοντέλο, μέσω της ίδιας πλατφόρμας. Παρέχονται πιο αποδοτικά εργαλεία για συνεργασία σε όλα τα στάδια του έργου, είτε πρόκειται για τα μέλη της ίδιας ομάδας, είτε διαφορετικών ομάδων και ειδικοτήτων, ακόμα και αν δουλεύουν απομακρυσμένα. Οι μεταβολές που καταχωρούνται από έναν χρήστη, αυτόματα μεταφέρονται σε όλα τα σχέδια και μπορούν να ενημερωθούν άμεσα όλοι οι εμπλεκόμενοι. Ακόμα και στο στάδιο της κατασκευής του έργου, οποιοδήποτε πρόβλημα προκύψει, επιλύεται άμεσα, καθώς όλες οι πληροφορίες υπάρχουν άμεσα διαθέσιμες στο μοντέλο. Η όλη διαδικασία που εφαρμόζεται στο πλαίσιο της τεχνολογίας BIM, η οποία επιτρέπει τη συνεργασία σε ένα ενιαίο κεντρικό μοντέλο, βοηθάει ώστε να καλλιεργηθεί κουλτούρα συνεργασίας με κοινό στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της κατασκευής του έργου.

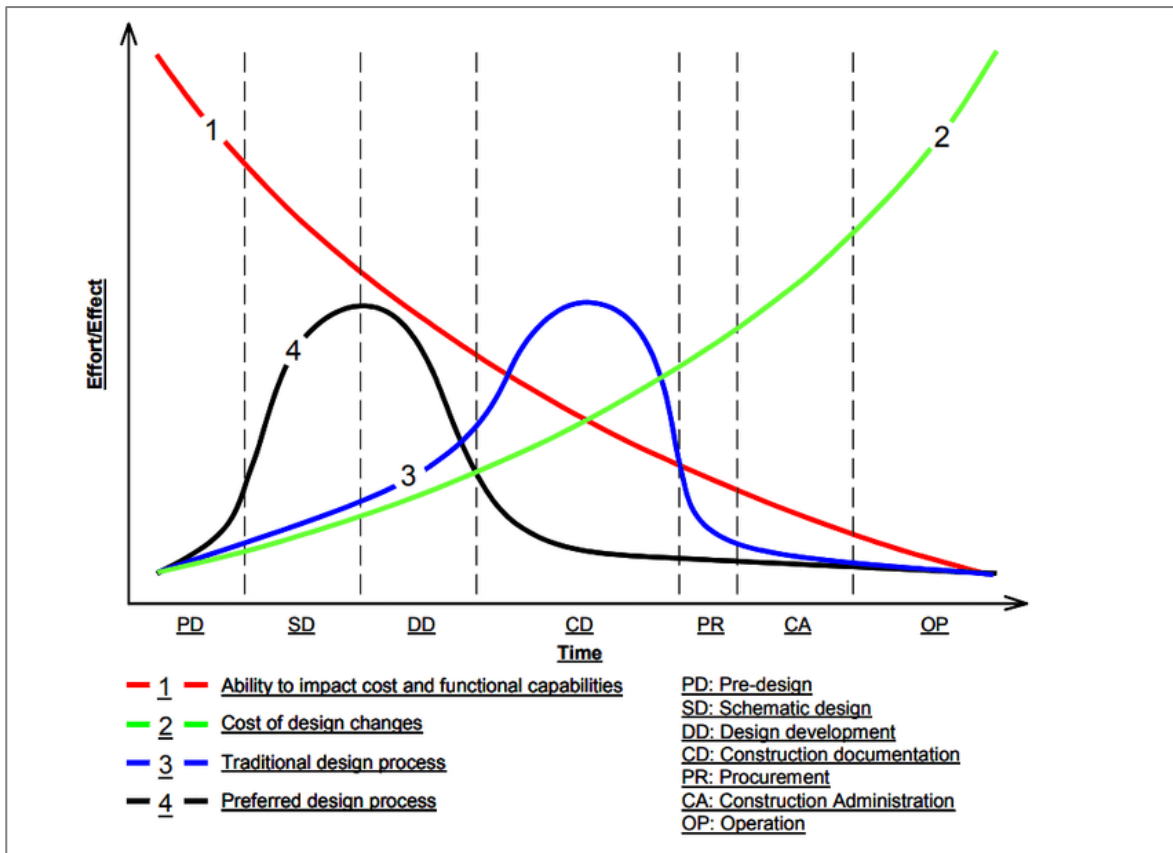


- Βελτιστοποίηση λήψης αποφάσεων

Με τη χρήση της τεχνολογίας BIM μπορούμε να διακρίνουμε πολύ νωρίς προβλήματα στο σχεδιασμό και κατ' αυτό τον τρόπο να ελαχιστοποιηθούν τα λάθη, και συνακόλουθα να κατασκευαστεί το έργο ταχύτερα και με μεγαλύτερη ασφάλεια. Οι τροποποιήσεις στη μελέτη επιφέρουν άμεσες αλλαγές στο κόστος του έργου και είναι θεμιτό αυτές να εντοπίζονται και να γίνονται στα αρχικά στάδια της μελέτης, κάτι το οποίο μπορεί να γίνει με τη χρήση της BIM (Panaitescu, 2014), (Wang et al, 2022).

- Βελτιστοποίηση εκτίμησης κόστους

Η χρήση της τεχνολογίας BIM βοηθάει με πολλούς τρόπους το στόχο της μείωσης του κόστους ενός έργου. Αρχικά, οι πληροφορίες των αντικειμένων του έργου είναι αποθηκευμένες στο μοντέλο κι έτσι ο υπολογισμός των ποσοτήτων γίνεται σχεδόν αυτόματα μέσω των εργαλείων και των εφαρμογών προμετρήσεων, ελαχιστοποιώντας τα πιθανά λάθη στις ποσότητες. Ο προϋπολογισμός γίνεται ταχύτερα, και έτσι υπάρχει η δυνατότητα για πραγματοποίηση αλλαγών νωρίς, ώστε να μην υπάρχει αρνητική επίδραση στο κόστος. Στην Εικόνα 10 φαίνεται το διάγραμμα της συνάρτησης κόστους - αποτελέσματος για την παραδοσιακή και για τη BIM διαδικασία. Επιπλέον, μέσω της χρήσης της τεχνολογίας BIM, μειώνεται ο χρόνος πέρατος τόσο της μελέτης όσο και της κατασκευής λόγω της άμεσης επικοινωνίας των εμπλεκομένων και της χρήσης των καλά οργανωμένων πληροφοριών που βρίσκονται στο μοντέλο στα διάφορα εργαλεία του λογισμικού. Ο ορθότερος προγραμματισμός οδηγεί στη μείωση εργατωρών και συνακόλουθα στη μείωση του τελικού προϋπολογισμού που θα προκύψει.



Εικόνα 10. Συνάρτηση κόστους - αποτελέσματος για την παραδοσιακή και για την BIM διαδικασία σχεδιασμού του έργου (Panaitescu, 2014)

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι κοινή συνισταμένη της όλης διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός ενιαίου ψηφιακού μοντέλου στην ίδια πλατφόρμα, πάνω στο οποίο εργάζονται στον ίδιο χρόνο όλοι οι εμπλεκόμενοι φορείς ενός έργου και παράλληλα η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων ανά κατηγορία εργασιών και υλικών. Έτσι λοιπόν η τεχνολογία BIM είναι μία πλατφόρμα διεπιστημονικής επικοινωνίας και συνεργασίας που επιτρέπει στους χρήστες, στους μελετητές και τους κατασκευαστές να συμμετέχουν ενεργά σε όλα τα στάδια του έργου. Με τη χρήση της BIM, διευκολύνονται διαδικασίες και αναλύσεις που έως τώρα ήταν αρκετά περίπλοκες, χρονοβόρες και όχι απόλυτα ακριβείς.

Το πανεπιστήμιο Stanford, βασισμένο στα στοιχεία εκτέλεσης τριάντα δύο (32) μεγάλων έργων που εκτελέστηκαν με τη χρήση της τεχνολογίας BIM, ποσοτικοποιεί τα παραπάνω οφέλη, ως κάτωθι:

- Έως 40% εξάλειψη των λαθών της μελέτης.



- Μέχρι 80% μείωση του χρόνου που απαιτείται για την εκτίμηση του κόστους.
- Εξοικονόμηση έως 10% του κόστους λόγω εντοπισμού ασυμβατοτήτων στη μελέτη.
- Μείωση έως 7% στο χρόνο εκτέλεσης του έργου.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της ΕΕ για την υιοθέτηση της μοντελοποίησης κατασκευαστικών πληροφοριών από τον ευρωπαϊκό δημόσιο τομέα (EUBIM Taskbook, 2017), προβλέπεται ότι η ευρύτερη υιοθέτηση της BIM θα έχει ως αποτέλεσμα μία εξοικονόμηση της τάξης του 15-25% στην παγκόσμια αγορά υποδομών έως το 2025. Υπολογίζεται ότι αν η ευρύτερη υιοθέτηση της BIM στην Ευρώπη είχε ως αποτέλεσμα 10% για τον κλάδο των κατασκευών, τότε θα αποδεδυμούνταν επιπλέον 130 δισεκατομμύρια ευρώ για την ευρωπαϊκή κατασκευαστική αγορά των 1,3 τρισεκατομμυρίων ευρώ (FIEC, Annual Report, 2017).

## 2.8 Μειονεκτήματα της τεχνολογίας BIM

- Κόστος εγκατάστασης λογισμικού και εκπαίδευσης προσωπικού

Στα μειονεκτήματα της χρήσης της τεχνολογίας BIM συγκαταλέγονται το μεγαλύτερο κόστος σε σύγκριση με τη χρήση CAD λογισμικού και η δυσκολία ανεύρεσης προσωπικού, το οποίο να είναι εκπαιδευμένο στη χρήση της (Ozcan Deniz, 2018). Σαφώς η εξοικείωση με τη χρήση νέων λογισμικών απαιτεί κάποιο χρόνο από το προσωπικό των επιχειρήσεων και υψηλό κόστος, τόσο για την αντικατάσταση των παλιών συστημάτων, όσο και για την εκπαίδευση του προσωπικού.

- Ασυμβατότητα μεταξύ λογισμικών

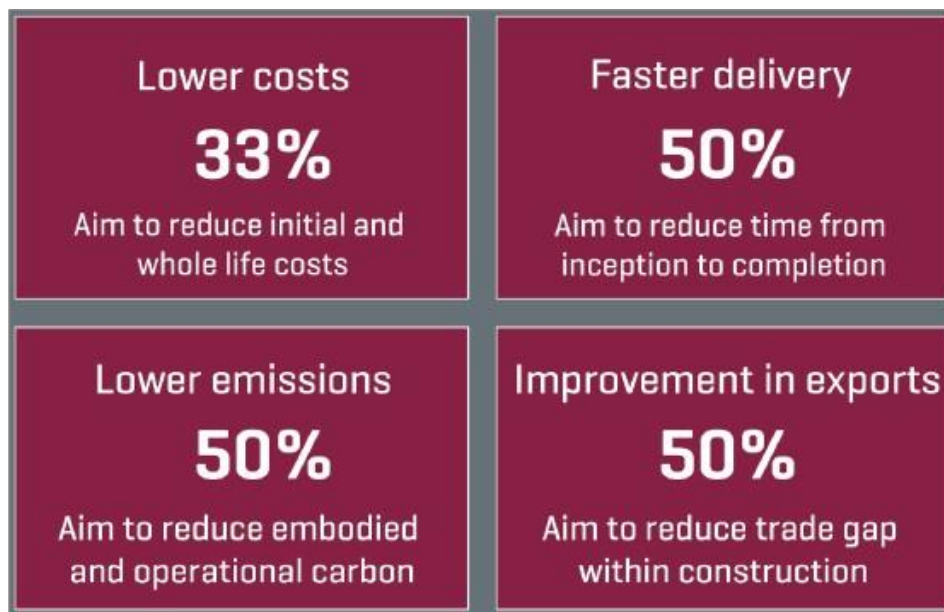
Οι περισσότεροι εκ των συμμετεχόντων στα έργα υποδομής είναι εξοικειωμένοι με συγκεκριμένα εργαλεία (λογισμικό και εξοπλισμό) και πολύ συχνά η μεταφορά των δεδομένων είναι περιορισμένη λόγω των προβλημάτων που προκύπτουν από



την ασυμβατότητα των λογισμικών. Αυτά τα δεδομένα, πρέπει να μετασχηματιστούν, κάτι που απαιτεί επιπλέον προσπάθεια και χρόνο.

## 2.9 Μελλοντικές προκλήσεις της τεχνολογίας BIM

Οι μελλοντικοί στόχοι της BIM μέχρι το 2025, όπως αυτοί ορίστηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο μέσω των Construction 2025 & Government Construction Strategy 2016-20, φαίνονται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11. Μελλοντικοί στόχοι BIM (Construction 2025 & GCS 2016-20)

Ένα πλήθος τεχνολογιών που συνεχώς αναβαθμίζονται (3D Printing, 5G, Digital Twins, Internet of Things, Machine Learning, DfMA, etc), βοηθούν τους στόχους της φιλοσοφίας της τεχνολογίας BIM, η οποία φτάνοντας στην απόλυτη υιοθέτησή της, καλείται να γίνει αρωγός στη δημιουργία έξυπνων πόλεων. Πόλεων δηλαδή όπου τα κτίρια τους θα συνδέονται με τα δίκτυά τους, τις κοινές υποδομές, το ενεργειακό τους αποτύπωμα και έτσι και με τους κατοίκους και την καθημερινότητά τους. Χαρακτηριστικό ενός έξυπνου κτιρίου είναι η καταγραφή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, ενεργοποιώντας την άμεση βέλτιστη απόδοση, είτε πρόκειται για υπηρεσίες κτιρίων (θέρμανση/φωτισμός, κ.λπ.), είτε



χρήσης (αξιοποίηση χώρου). Αυτά τα δύο στοιχεία μπορούν στη συνέχεια να υποστηρίξουν την υγεία και την ευεξία των κατοίκων και να μετριάσουν τις επιπτώσεις των κτιρίων στο περιβάλλον.



Εικόνα 12. Smart City (Πηγή: <https://www.forbes.com/>)



### 3. Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ DIGITAL TWINS - DTs

#### 3.1 Γενικά στοιχεία για την τεχνολογία των Digital Twins (DTs)

Τα DTs (ψηφιακά δίδυμα) αποτελούν μία εικονική - ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος, που επιτρέπει στο χρήστη την παροχή πληροφοριών για την απόδοση και για τη λειτουργία του συστήματος. Το DT συνδέεται με το φυσικό του δίδυμο και επιτρέπει κατ' αυτό τον τρόπο το σχηματισμό μίας σχέσης μεταξύ τους, όπου συμβάντα του φυσικού διδύμου μεταφέρονται αυτόματα στο ψηφιακό. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται μέσω διάφορων δεδομένων που προέρχονται από αισθητήρες που βρίσκονται εγκατεστημένοι στο φυσικό σύστημα. Με το συνδυασμό όλων αυτών των δεδομένων που καταγράφονται σε πραγματικό χρόνο και του ιστορικού των λειτουργικών δεδομένων, σε συνδυασμό με τις επιστημονικές γνώσεις, προκύπτει η ψηφιακή αναπαράσταση των ψηφιακών διδύμων. (Sacks et al, 2020)

Ένας πιο σύντομος, ευρέως διαδεδομένος και αποδεκτός ορισμός, ορίζει το ψηφιακό δίδυμο ως μιας πολλαπλής κλίμακας προσομοίωση των φυσικών λειτουργιών ενός συστήματος, η οποία χρησιμοποιεί την τεχνολογία αισθητήρων ώστε να αντικατοπτρίσει τη λειτουργία του φυσικού μοντέλου σε όλο τον κύκλο της ζωής αυτού. (Glaessgen, Stargel, 2012)

Η ιστορία των DTs αρχίζει απ' το 1970, όταν δημιουργεί η NASA εικονικά συστήματα παρακολούθησης των χώρων που δεν δύναται να είναι φυσικά προσιτοί (όπως παραδείγματος χάρη τα διαστημόπλοια ενώ βρίσκονται σε μία αποστολή) για να δίνονται απομακρυσμένα λύσεις σε πιθανά προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν. Η πρώτη προσπάθεια είναι η δημιουργία της προσομοίωσης του Apollo 13, με το σκεπτικό να παραμείνει κατά τη διάρκεια της αποστολής πίσω στη γη ένα πανομοιότυπο σκάφος, το οποίο θα επιτρέπει στους επιστήμονες να εξετάζουν και να αναλύουν τα αποτελέσματα των εντολών προτού αυτές δοθούν και εφαρμοστούν στο διαστημόπλοιο που βρίσκεται ήδη στο πεδίο της αποστολής.





Το 2003 γίνεται η πρώτη αναφορά του όρου “ψηφιακό δίδυμο” από τον Dr. Grieves σε μία διάλεξη του στο πανεπιστήμιο του Michigan. Στην διάλεξη αυτή, παρουσιάστηκε ένα προτεινόμενο θεωρητικό μοντέλο για τη διαχείριση ολόκληρου του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, το οποίο έχει ως βασική του αρχή λειτουργίας την ύπαρξη δύο συστημάτων, του φυσικού και του εικονικού (Camposano et al, 2021). Τα δύο αυτά συστήματα θα επικοινωνούν μεταξύ τους με τη συνεχή ροή δεδομένων, τα οποία θα επιτρέπουν τη σύγκλιση και το συγχρονισμό τους (Grieves, 2003). Δέκα χρόνια μετά από την πρώτη αναφορά του όρου των DTs, μία ερευνητική ομάδα της NASA πρότεινε ένα μοντέλο στο οποίο το ψηφιακό δίδυμο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν ένας εικονικός αισθητήρας, ο οποίος θα μπορούσε να προβλέψει τη διάρκεια ζωής ενός διαστημικού αεροσκάφους και να διασφαλίσει κατ’ αυτόν τον τρόπο την ποιοτική λειτουργία του (Tuegel et al, 2011).

Η ορολογία του Grieves έχει αλλάξει από τότε, όμως η βασική αρχή λειτουργίας που είχε περιγράψει πριν από 20 περίπου χρόνια, παραμένει η ίδια. Το 2017, εξελίσσοντας τη θεωρία του, δημοσιεύεται στο (Grieves et al, 2017) ότι η ψηφιακή αναπαράσταση ιδανικά θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες εκείνες τις πληροφορίες αναφορικά με τα στοιχεία του συστήματος που ενδεχομένως θα μπορούσαν να ληφθούν μέσω της ενδελεχούς επιθεώρησης του συστήματος στον πραγματικό κόσμο.

Τέλος, στο (Tao et al, 2018) αναγράφονται οι ιδιότητες οι οποίες χαρακτηρίζουν ένα DT, και είναι οι ακόλουθες:

- Αντικατοπτρισμός του φυσικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο.
- Σύνδεση των δεδομένων σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του φυσικού μοντέλου.
- Διαρκής αυτόματη ενημέρωση του DT.



### 3.2 Βασικές τεχνολογίες που οδήγησαν στα DTs

Οι βασικές τεχνολογίες που οδήγησαν στη δημιουργία και έπειτα στην εφαρμογή των DTs είναι οι κάτωθι:

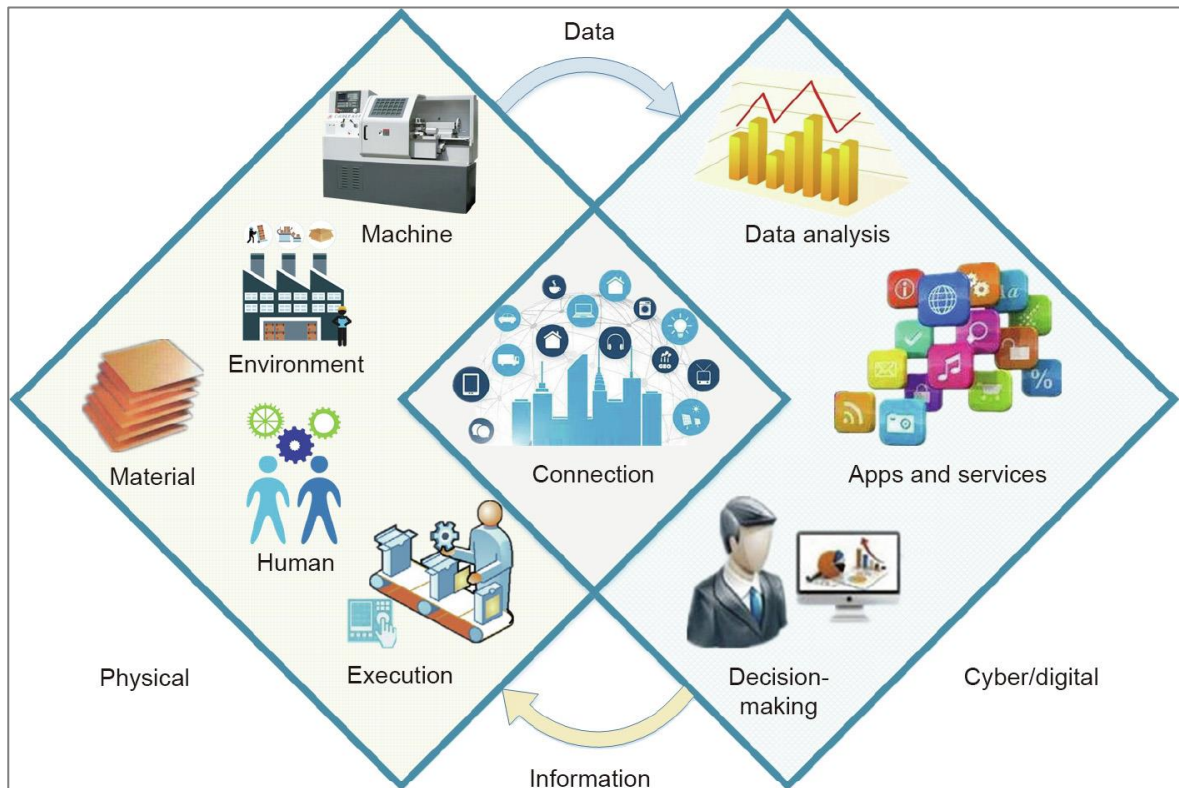
- Cyber Physical Systems (CPS)

Τα CPS είναι πολύπλοκα συστήματα τα οποία κατανέμονται σε ορισμένες μονάδες ελέγχου και επικοινωνούν - αλληλεπιδρούν με το φυσικό περιβάλλον (Geismann, Bodden, 2020). Η προέλευση του συγκεκριμένου όρου επινοήθηκε από την Helen Gill το 2006, και χρησιμοποιήθηκε για να περιγραφούν πολύπλοκα συστήματα που δεν ήταν δυνατό να απεικονιστούν αποτελεσματικά με τη χρήση της τότε παραδοσιακής πληροφορικής (Gill, 2006).

Η τεχνολογία των CPS ορίζεται ως η ολοκλήρωση φυσικών και υπολογιστικών διεργασιών σε μία κατασκευή που περιλαμβάνει δύο μέρη, το φυσικό και το ψηφιακό (Kim et al, 2010). Το φυσικό μέρος τους αποτελείται από ανθρώπινους πόρους, υλικά, μηχανές, περιβάλλον, ενώ το ψηφιακό μέρος τους από υπηρεσίες και εφαρμογές, ενσωματώνοντας δυνατότητες διαχείρισης δεδομένων και αναλυτικών στοιχείων. Οι εφαρμογές αυτές επιτρέπουν στην όλη κατασκευή να βελτιώσει τη γενικότερη απόδοσή της, καθώς το φυσικό μέρος συλλέγει διάφορα δεδομένα και οι αποφάσεις εκτελούνται στο ψηφιακό μέρος. Το ψηφιακό μέρος στη συνέχεια επεξεργάζεται και αναλύει τα εν λόγω δεδομένα λαμβάνοντας τις κατάλληλες ανά περίπτωση αποφάσεις. Μέσω της σύνδεσης αυτής, το φυσικό μέρος μπορεί να επηρεάσει τις όποιες ψηφιακές διαδικασίες και το αντίστροφο. (Lee, 2015)

Η ουσία της υπόψη τεχνολογίας είναι να προσθέσει νέες δυνατότητες στα φυσικά συστήματα (Wang et al, 2015). Τα CPS παρέχουν υπηρεσίες πληροφοριών και δυναμικού ελέγχου σε πραγματικό χρόνο και σε σύγκριση με τα ψηφιακά δίδυμα δίνουν μεγαλύτερο βάρος στο δυναμικό προγραμματισμό και την επικοινωνία, οι οποίες δύναται να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια του φυσικού κόσμου (Lee et al, 2010). Τα CPS σε αντίθεση με τα DTs επικεντρώνονται βασικά στον έλεγχο και όχι τόσο στην απεικόνιση. Στην Εικόνα 13

φαίνεται η σύνδεση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού κόσμου.



Εικόνα 13. Σύνδεση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού κόσμου (Tao et al, 2019)

#### - Internet of Things (IoT)

Η ιδέα του Internet of Things αναπτύχθηκε αρχικά στο Ινστιτούτο τεχνολογίας της Μασαχουσέτης το 1999 και ορίζεται ως ένα δίκτυο μηχανημάτων τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν στα διάφορα αντικείμενα να μοιράζονται δεδομένα και πληροφορίες, ενώ έπειτα από επεξεργασία μπορούν να λαμβάνουν και τις κατάλληλες αποφάσεις (Adat et al, 2018).

Στο φυσικό κόσμο, μέσω αισθητήρων, συλλέγονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, τα οποία μεταδίδονται με τη χρήση διαφόρων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Κατ' αυτόν τον τρόπο το IoT αλλάζει τον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες αλληλεπιδρούν με ένα σύστημα. Τα ψηφιακά και φυσικά δεδομένα σχηματίζουν ένα δίκτυο επικοινωνίας που τους επιτρέπει όχι μόνο να συνδέονται, αλλά και να ανταλλάσσουν μεταξύ τους δεδομένα και τελικά να αλληλεπιδρούν.



#### - Big Data Management

Big Data ονομάζεται η τεχνολογία που επεξεργάζεται τους τρόπους συστηματικής εξαγωγής και ανάλυσης πληροφοριών και ασχολείται με διάφορα σύνολα δεδομένων πολύ ογκώδη και πολύπλοκα, τα οποία δεν δύναται να μελετηθούν από κάποιο παραδοσιακό λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων (Chan, 2014). Η μορφή αυτών των δεδομένων ποικίλει και μπορεί να περιλαμβάνει γεωμετρία, εικόνες, κείμενα, ήχο, βίντεο κλπ, ενώ η ανάλυσή τους πραγματοποιείται σύμφωνα με τους εξής τρεις δείκτες, την ταχύτητα, τον όγκο και την ποικιλομορφία (Bangui et al, 2018).

Ο μεγάλος όγκος δεδομένων και η διαχείρισή που απαιτείται για τη λειτουργία των DTs, καθιστά το Big Data Management ως θεμέλιο λίθο τους (Rosen et al, 2015), καθώς η καταγραφή, η επεξεργασία και η ανάλυση του μεγάλου όγκου δεδομένων που παράγονται καθόλη τη διάρκεια ζωής ενός φυσικού μοντέλου είναι απαραίτητη για την άρτια λειτουργία ενός ψηφιακού διδύμου (Kan and Anumba, 2019).

### 3.3 DTs στον κλάδο των κατασκευών

Το κατασκευαστικό DT είναι η σύνδεση των μοντέλων, των πληροφοριών και των διάφορων δεδομένων από αισθητήρες, περιγράφοντας εικονικά πλήρως μία υπάρχουσα ή μία μελλοντική κατασκευή, αναπαριστώντας το σύνολο των πτυχών της φυσικής κατασκευής. Το κατασκευαστικό DT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μοντελοποίηση, οπτικοποίηση, ανάλυση, προγραμματισμό, παρακολούθηση και πρόβλεψη της απόδοσης μίας κατασκευής (Qi et al, 2019). Εξελίσσεται παράλληλα με την εξέλιξη της φυσικής κατασκευής και παραμένει ενεργό σε όλη τη διάρκεια της ζωής της, ενώ σε ένα προηγμένο DT οι ενέργειες που συντελούνται σε αυτό, αντικατοπτρίζονται αυτόματα και πάνω στην κατασκευή, καθοδηγώντας έτσι τη συμπεριφορά της.

Επιπλέον, τα δεδομένα και οι πληροφορίες που καταγράφονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία μπορούν να

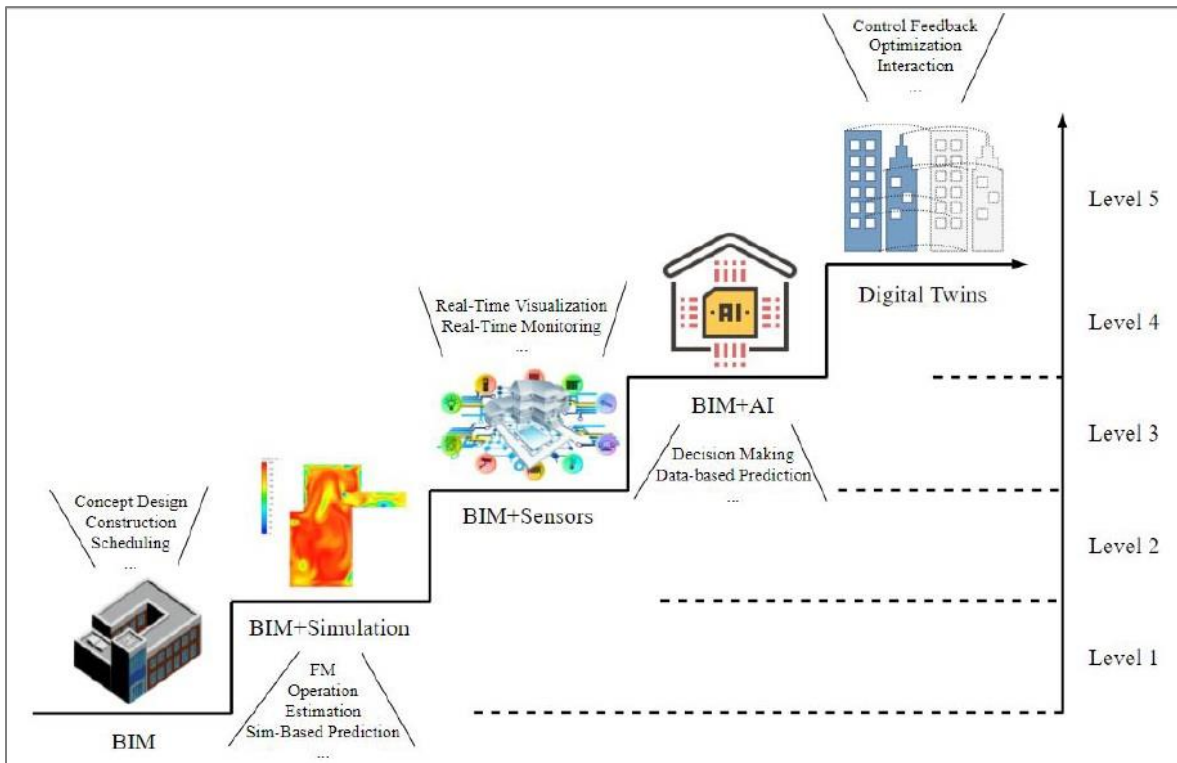


μιμηθούν τη συμπεριφορά της κατασκευής και συνακόλουθα να αξιολογήσουν διαφορετικά σενάρια προβλέποντας τη συμπεριφορά αυτή σε διαφορετικές κάθε φορά επικρατούσες συνθήκες. Έτσι το DT μπορεί να αντικατοπτρίζει παράλληλα πολλές πραγματικότητες.

Τα κατασκευαστικά DTs είναι ένας τρόπος διαχείρισης της κατασκευής, ο οποίος αξιοποιεί τη ροή των δεδομένων μέσω διάφορων τεχνολογιών παρακολούθησης και διάφορων έξυπνων λειτουργιών, για την παροχή πληροφοριών, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της παραγωγής. (Sacks et al, 2020)

Σύμφωνα με το (Boje et al, 2020) η ανάπτυξη ενός κατασκευαστικού DT χωρίζεται πρωτίστως σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση περιγράφεται ως μία βελτιωμένη έκδοση του BIM με εφαρμογή σε εργοτάξια. Στη δεύτερη φάση τα κατασκευαστικά DTs μετατρέπονται σε πλατφόρμες παρακολούθησης, όπου αναπτύσσεται μία κοινή γλώσσα σύνδεσης του DT με όλες τις εγκατεστημένες IoT συσκευές. Στην τρίτη φάση αξιοποιώντας όλα τα δεδομένα που συλλέγουμε από τους αισθητήρες της κατασκευής και με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης, το φυσικό μοντέλο επικοινωνεί - αλληλεπιδρά με το ψηφιακό και λαμβάνονται αποφάσεις που βελτιώνουν την κατάσταση της κατασκευής.

Εντός του ίδιου πλαισίου, απλώς αυξάνοντας τις κατηγορίες - φάσεις εξέλιξης του ψηφιακού διδύμου από το BIM μοντέλο, στο (Deng et al, 2021) συναντάμε την Εικόνα 14.



Εικόνα 14. Από το BIM στα DTs (Deng et al, 2021)

### 3.4 Πλεονεκτήματα της χρήσης DTs στον κλάδο των κατασκευών

Τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης των DTs στις κατασκευές είναι:

- Συνεχής παρακολούθηση της κατασκευής

Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο ενός εργοταξίου μέσω ενός DT μας δίνει τη δυνατότητα να επιβεβαιώσουμε ότι οι εργασίες που εκτελούνται είναι σύμφωνες με τη μελέτη και το σχεδιασμό μας, ενώ σε μία ήδη υπάρχουσα κατασκευή η παρακολούθηση της μέσω των κατάλληλων αισθητήρων μας βοηθάει να λάβουμε άμεσα μέτρα για τις απαραίτητες εργασίες συντήρησης και όποιες άλλες επεμβάσεις δύναται να βελτιώσουν την κατάσταση της κατασκευής και το ενεργειακό της αποτύπωμα (Bolshakov et al, 2020).

- Βέλτιστη χρήση των πόρων

Η υιοθέτηση των DTs στις κατασκευές βοηθάει τόσο στην ορθή κατανομή και



χρήση των υλικών ώστε να μειωθούν η ποσότητες των περιττών υλικών, όσο και στην ορθή χρήση εξοπλισμού ώστε όσα μηχανήματα δεν χρησιμοποιούνται, να μπορούν αποδεσμεύονται άμεσα για τη χρήση τους σε άλλα έργα.

- Ασφαλέστερες κατασκευές

Όσον αφορά στο εργοτάξιο, τα DTs επιτρέπουν στις αρχές επίβλεψης να εντοπίζουν εργαζόμενους που κινούνται σε επικίνδυνους χώρους ή χρησιμοποιούν μη ασφαλή υλικά χωρίς τα απαραίτητα μέτρα προστασίας, ώστε να προλαμβάνουν διάφορα πιθανά ατυχήματα. Όσον αφορά στον υπόλοιπο κύκλο ζωής της κατασκευής, μέσω των DTs δύναται να αναπτυχθεί ένα σύστημα έγκαιρης ειδοποίησης που θα ενημερώνει τους χρήστες για διάφορους κινδύνους, όπως παραδείγματος χάρη την ύπαρξη κάποιας φωτιάς, διαρροής ηλεκτρικής ενέργειας, κλπ.

### 3.5 Έξυπνα κτίρια

Για να μπορέσει ένα DT να έχει εφαρμογή σε κάποιο κτίριο, θα πρέπει το εν λόγω κτίριο να πληρεί ορισμένες προδιαγραφές. Θα πρέπει το κτίριο να έχει εγκατεστημένη τεχνολογία που θα του επιτρέψει να μοιράζεται δεδομένα και πληροφορίες, οι οποίες θα περιγράφουν τι ακριβώς συμβαίνει στο κτίριο, ώστε να παίρνονται αποφάσεις και να βελτιστοποιείται η απόδοσή του μέσω της αυτοματοποίησης διάφορων διεργασιών και συστημάτων όπως η θέρμανση, ο φωτισμός, ο κλιματισμός κλπ.

Οι βασικές λειτουργίες που καθιστούν ένα κτίριο “έξυπνο” είναι οι κάτωθι:

- Κλιματική απόκριση

Ένα έξυπνο κτίριο μπορεί και ανταποκρίνεται στις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες (τόσο στις πραγματικές όσο και στις αναμενόμενες μέσω των αντίστοιχων προβλέψεων) και προσαρμόζεται στην καλύτερη δυνατή του λειτουργία, μειώνοντας το ενεργειακό του αποτύπωμα.



- Απόκριση δικτύου

Η έξυπνη απόκριση είναι ο συνδυασμός μετρήσεων και ανταλλαγής δεδομένων σε ένα έξυπνο κτίριο που μπορεί να αλληλεπιδρά με τις πληροφορίες που παίρνει μέσω αισθητήρων. Σκοπός της απόκρισης δικτύου είναι να μειωθεί η υπερφόρτωση αυτού και να οργανώνεται η κατανάλωση της ενέργειας όταν υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα και συνακόλουθα πιο συμφέρουσα τιμή. Η διαδικασία αυτή απαιτεί ένα σύστημα επικοινωνίας με αισθητήρες, αυτοματοποιημένες μετρήσεις, έξυπνες συσκευές και επεξεργαστές.

- Απόκριση χρήστη

Με την εν λόγω απόκριση ορίζεται η ικανότητα ενός έξυπνου κτιρίου να αλληλεπιδρά σε πραγματικό χρόνο με τους χρήστες και τις τεχνολογίες που εφαρμόζονται ανά περίπτωση. Ο χρήστης μπορεί να αλληλεπιδράσει με τα συστήματα και τον εξοπλισμό του κτιρίου ώστε να προκύψουν οι βέλτιστες συνθήκες άνεσης με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. (Ponds et al, 2018)

- Παρακολούθηση και επίβλεψη

Η δυνατότητα παρακολούθησης του κτιρίου, του εξοπλισμού του και της συμπεριφοράς των χρηστών του σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνει τα ανωτέρω χαρακτηριστικά και οδηγεί σε μία πιο αποτελεσματική λειτουργία του κτιρίου μέσω της προληπτικής συντήρησης, του έγκαιρου εντοπισμού των βλαβών κλπ.

Συνοπτικά, βλέπουμε πως ένα έξυπνο κτίριο καθίσταται κατάλληλο για την εφαρμογή της τεχνολογίας των DTs όταν:

- Χρησιμοποιεί μετρητές και αισθητήρες σε διάφορες λειτουργίες, μηχανήματα και συσκευές.
- Χρησιμοποιεί λογισμικά επεξεργασίας των δεδομένων που λαμβάνει μέσω των μετρητών και των αισθητήρων ώστε να εξάγονται συνεχώς χρήσιμες πληροφορίες και να λαμβάνονται αποφάσεις ή ακόμα και να προβλέπονται



μελλοντικές καταστάσεις.

- Χρησιμοποιεί ένα δίκτυο επικοινωνίας που επιτρέπει στο κτίριο να μπορεί να λειτουργεί σαν ένα ενιαίο σύνολο, συνδέοντας τα δεδομένα όλων των συσκευών μεταξύ τους.

### 3.6 Έξυπνες πόλεις

Το αμέσως επόμενο βήμα έπειτα από τη δημιουργία των έξυπνων κτιρίων είναι η σύσταση των έξυπνων πόλεων. Ο όρος της έξυπνης πόλης είναι ένας όρος που ακούγεται όλο και συχνότερα από διάφορες κυβερνήσεις κρατών σε ολόκληρη την υφήλιο, καθώς πλέον έχουν αναπτυχθεί οι τεχνολογίες εκείνες που επιτρέπουν τη δημιουργία της. Το σκαρίφημα ενός ολοκληρωμένου δικτύου έξυπνης πόλης φαίνεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15. Smart City (Πηγή: <https://www.forbes.com/>)



Μία έξυπνη πόλη έχει τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

- Επίγνωση

Η έξυπνη πόλη έχει επίγνωση σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες, όπως παραδείγματος χάρη περιβαλλοντικές συνθήκες (επίπεδα ρύπανσης, θερμοκρασία, κλπ), η κυκλοφορία (συμφόρηση στο οδικό δίκτυο, στα μέσα μαζικής μεταφοράς, κλπ), η δημόσια ασφάλεια (καταστάσεις ανάγκης, ακραία φαινόμενα, κλπ).

- Απόκριση

Η ευαισθητοποίηση σε συνδυασμό με τους άμεσους χρόνους απόκρισης καθιστούν μία πόλη έξυπνη, καθώς στη λειτουργία της, οι όποιες αποτελεσματικές αντιδράσεις δύναται να αποτρέψουν την αποφυγή καταστροφών και την κλιμάκωση επικίνδυνων καταστάσεων.

- Πρόβλεψη

Μία έξυπνη πόλη έχει την ικανότητα να προβλέπει και να δρα προληπτικά σε διάφορα συμβάντα με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης.

Ήδη στις μέρες μας πολλά τμήματα μίας έξυπνης πόλης έχουν πάρει σάρκα και οστά και αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων πόλεων. Κάποιες από τις τεχνολογίες που ήδη χρησιμοποιούνται είναι οι κάτωθι:

- Αισθητήρες εγκατεστημένοι σε διάφορα κτίρια που μετρούν μεγέθη όπως η δύναμη του ανέμου, η σεισμική δραστηριότητα, η καθίζηση των θεμελίων κάποιων μεγάλων κατασκευών, κλπ.
- Αισθητήρες εγκατεστημένοι στο εσωτερικό κτιρίων για την ανίχνευση της ύπαρξης ατόμων σε διάφορους χώρους ώστε να ελεγχθεί η χρήση θέρμανσης και φωτισμού.
- Αισθητήρες εγκατεστημένοι σε οδοστρώματα ώστε να καταγράφεται η ροή της κυκλοφορίας, οι φθορές, οι καθιζήσεις κλπ.



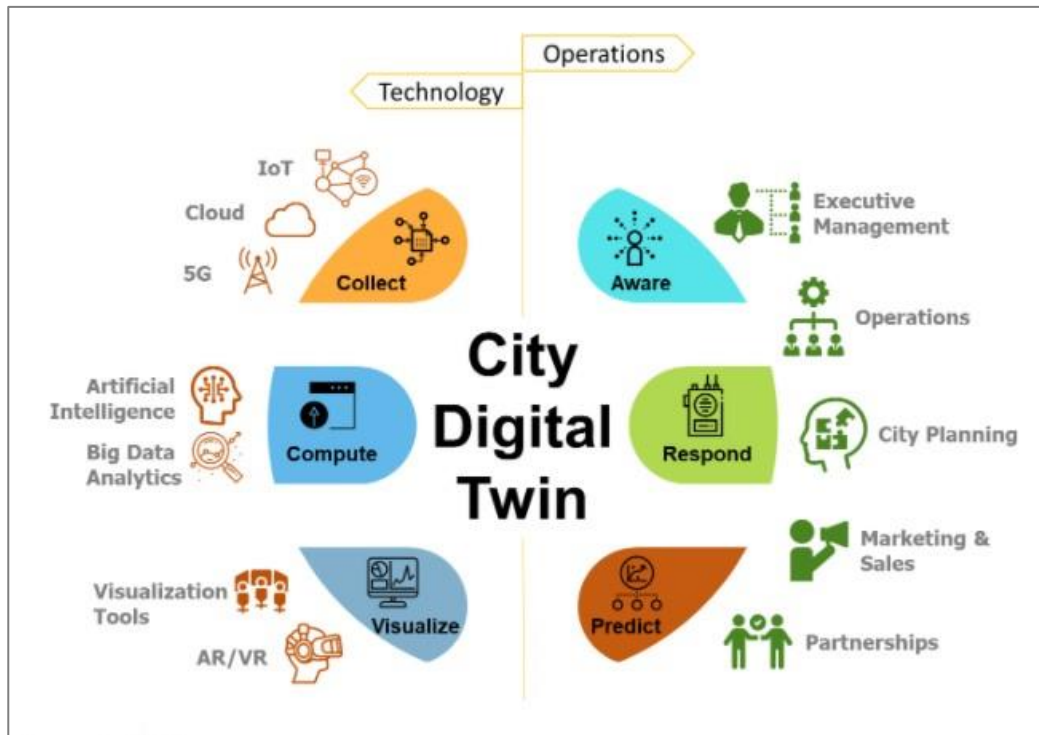
- Αισθητήρες εγκατεστημένοι στις εισόδους κτιρίων για αναγνώριση προσώπων και ενίσχυση της ασφάλειας.
- Αισθητήρες εγκατεστημένοι σε ποτάμια και γέφυρες που καταγράφουν τη στάθμη του νερού, τη διάβρωση των όχθων του ποταμού, την ορμή του νερού, κλπ.
- Αισθητήρες εγκατεστημένοι σε διάφορα σημεία μίας πόλης που μετράνε τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την ποιότητα του αέρα, κλπ.
- Αισθητήρες εγκατεστημένοι σε κεντρικούς δρόμους που ανιχνεύουν την ύπαρξη θέσεων παρκινγκ και ενημερώνουν μέσω εφαρμογής τους οδηγούς.

Η ύπαρξη όλων αυτών των αισθητήρων και η δυνατότητα που υπάρχει να συνδέονται και να επεξεργάζονται τα δεδομένα τους μπορεί να ωφελήσει την πόλη σε διάφορους τομείς, καθώς θα παίρνονται ορθότερες αποφάσεις στηριζόμενες σε περισσότερα κάθε φορά δεδομένα, που θα οδηγήσουν σε μεγαλύτερα επίπεδα δημόσιας ασφάλειας, βελτιωμένες συγκοινωνίες, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, μείωση της ρύπανσης, κλπ.

Μία ομάδα μηχανικών από το Newcastle College σε συνεργασία με την εταιρία ύδρευσης Northumbrian Water, δημιούργησαν ένα DT της πόλης του Newcastle, με στόχο να προσομοιώσουν πιθανές έκτακτες καταστάσεις ώστε να μπορέσουν να ανταποκριθούν ορθότερα σε διάφορα περιστατικά καταστροφών. Μέσω αυτής της εικονικής αναπαράστασης εκτελούνται προσομοιώσεις περιστατικών όπως διαρροές σωληνώσεων, έντονες βροχοπτώσεις, μεγάλες πλημμύρες, κλπ, και εντοπίζονται τα πιο αδύναμα σημεία της πόλης, στα οποία θα εμφανιστούν τα πιο έντονα προβλήματα τις πρώτες εικοσιτέσσερις ώρες. Στη συνέχεια επεμβαίνουν επιλεκτικά για να αποκαταστήσουν τις όποιες δυσχέρειες.

Η ερευνητική εταιρία International Data Corporation (IDC) προβλέπει ότι μέχρι το τέλος του 2023, το 25% από τις πλατφόρμες DTs που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία έξυπνων πόλεων θα χρησιμοποιούνται για την αυτοματοποίηση όλο

και πιο περίπλοκων διαδικασιών σε διασυνδεδεμένα οικοσυστήματα. Σχηματικά οι τεχνολογίες και τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση τους φαίνονται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16. Τεχνολογίες City Digital Twin και οφέλη (Πηγή: IDC, 2020)

Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα της Juniper Research (Smart Cities: Key technologies, Environmental impact & market forecast 2022-2026), οι δαπάνες σε υποδομές, εφαρμογές και λύσεις που σχετίζονται με τη δημιουργία έξυπνων πόλεων θα αγγίξουν σε παγκόσμιο επίπεδο τα 70 δις \$ από τα 35 δις \$ το 2021. Η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω των έξυπνων πόλεων εκτιμάται ότι θα φτάσει τα 96 δις \$ παγκοσμίως το 2026.

Στο πλαίσιο της ανωτέρω έρευνας αξιολογήθηκε και ο βαθμός στον οποίο οι σύγχρονες μητροπόλεις βρίσκουν καινοτόμους τρόπους για να αξιοποιήσουν την τεχνολογία προσφέροντας μετρήσιμα οφέλη για τους πολίτες της, όπως έξυπνες μεταφορές και υποδομές, έξυπνο σύστημα ενέργειας και φωτισμού, έξυπνη διαχείριση της κυκλοφορίας κλπ. Έπειτα από την εν λόγω αξιολόγηση προέκυψαν οι πέντε πιο έξυπνες πόλεις του κόσμου με τη Σανγκάη να βρίσκεται στην πρώτη



θήση, τη Σεούλ στη δεύτερη, τη Βαρκελώνη στην τρίτη, το Πεκίνο στην τέταρτη και τη Νέα Υόρκη στην πέμπτη θέση.

### 3.7 Μελλοντικές προοπτικές

Είναι εμφανές ότι τα DTs είναι μία καινοτόμα τεχνολογία που όσο "ωριμάζει" και μεγαλώνει το ποσοστό υιοθέτησής της, τόσο περισσότερο θα μπορεί να συνδράμει στην εξέλιξη των κατασκευών στο επόμενο επίπεδο και στη δημιουργία των έξυπνων κτιρίων και των έξυπνων πόλεων.

Για να περάσουμε σε αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο να εξελιχθούν όλες αυτές οι τεχνολογίες των DTs που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση και την ερμηνεία πολλαπλών ροών πληροφοριών και δεδομένων, ενώ παράλληλα θα πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλοι μηχανισμοί διεπαφής όλων των επιπέδων των DTs.

Η εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης και των οντολογιών θα συνδράμει προς τον σκοπό αυτό. Θα καταστήσει δυνατό τα DTs να μπορούν να διαχειριστούν ένα τεράστιο όγκο πολυεπίπεδων δεδομένων, να συνδυάσουν τα διάφορα επίπεδα και μοντέλα και τέλος να προβλέψουν πιθανές μελλοντικές καταστάσεις και να παίρνουν ανά περίπτωση τις ορθότερες δυνατές αποφάσεις. Μόνο έτσι θα μπορέσουν τα DTs να επιτελέσουν στον απόλυτο βαθμό το σκοπό τους και να είναι τα δυναμικά εκείνα μοντέλα που όχι απλά αναπαριστούν το φυσικό μοντέλο, αλλά έχουν και τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης και παρέμβασης στο φυσικό κόσμο (Lu et al, 2020).

## 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ BIM & DTs ΣΕ ΠΙΛΟΤΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ

### 4.1 Γενικά στοιχεία του κτιρίου

Για την εφαρμογή της τεχνολογίας BIM και DTs, επιλέχθηκε ένα διώροφο κτίριο εμβαδού χιλίων επτακοσίων σαράντα έξι τετραγωνικών μέτρων (1.746 m<sup>2</sup>), το οποίο βρίσκεται στο αεροδρόμιο της Λάρισας και χρησιμοποιείται για τη στέγαση του προσωπικού. Το εν λόγω κτίριο αποτελείται από σαράντα (40) κοιτώνες, οι οποίοι ανακαινίστηκαν στο πλαίσιο του έργου LIFE11 ENV/GR/938/Military Energy and Carbon Management.

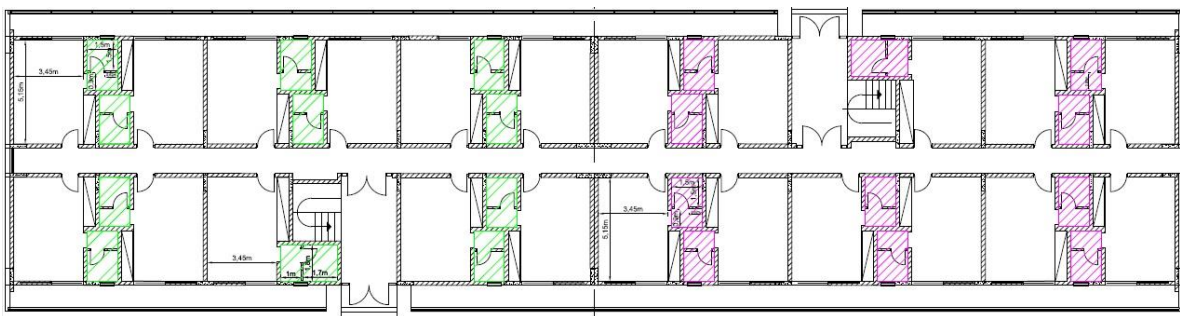
Οι εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης που έγιναν στο κτίριο, μεταξύ άλλων περιελάμβαναν και την τοποθέτηση κεντρικού ηλιακού συστήματος συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας 25 m<sup>2</sup>, την αντικατάσταση του υφιστάμενου δοχείου αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης με νέο τριπλής ενέργειας χωρητικότητας 1.000 lt και την εγκατάσταση μετρητών κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η υφιστάμενη εικόνα του κτιρίου φαίνεται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17. Πιλοτικό κτίριο εφαρμογής τεχνολογίας BIM & DTs

#### 4.2 Σχεδιασμός μοντέλου σε BIM

Για την υλοποίηση της τεχνολογίας BIM στο εν λόγω κτίριο αξιοποιήθηκαν τόσο τα υπάρχοντα σχέδια των κατόψεων αυτού, όπως φαίνονται στην Εικόνα 18, όσο και λεπτομερείς μετρήσεις όλων των στοιχείων της κατασκευής στο πεδίο. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος Revit 2022 της Autodesk και προέκυψε το τρισδιάστατο μοντέλο της κατασκευής. Το επίπεδο σχεδιαστικής λεπτομέρειας είναι LOD4, καθώς απεικονίζονται και λεπτομέρειες στο εσωτερικό του κτιρίου.



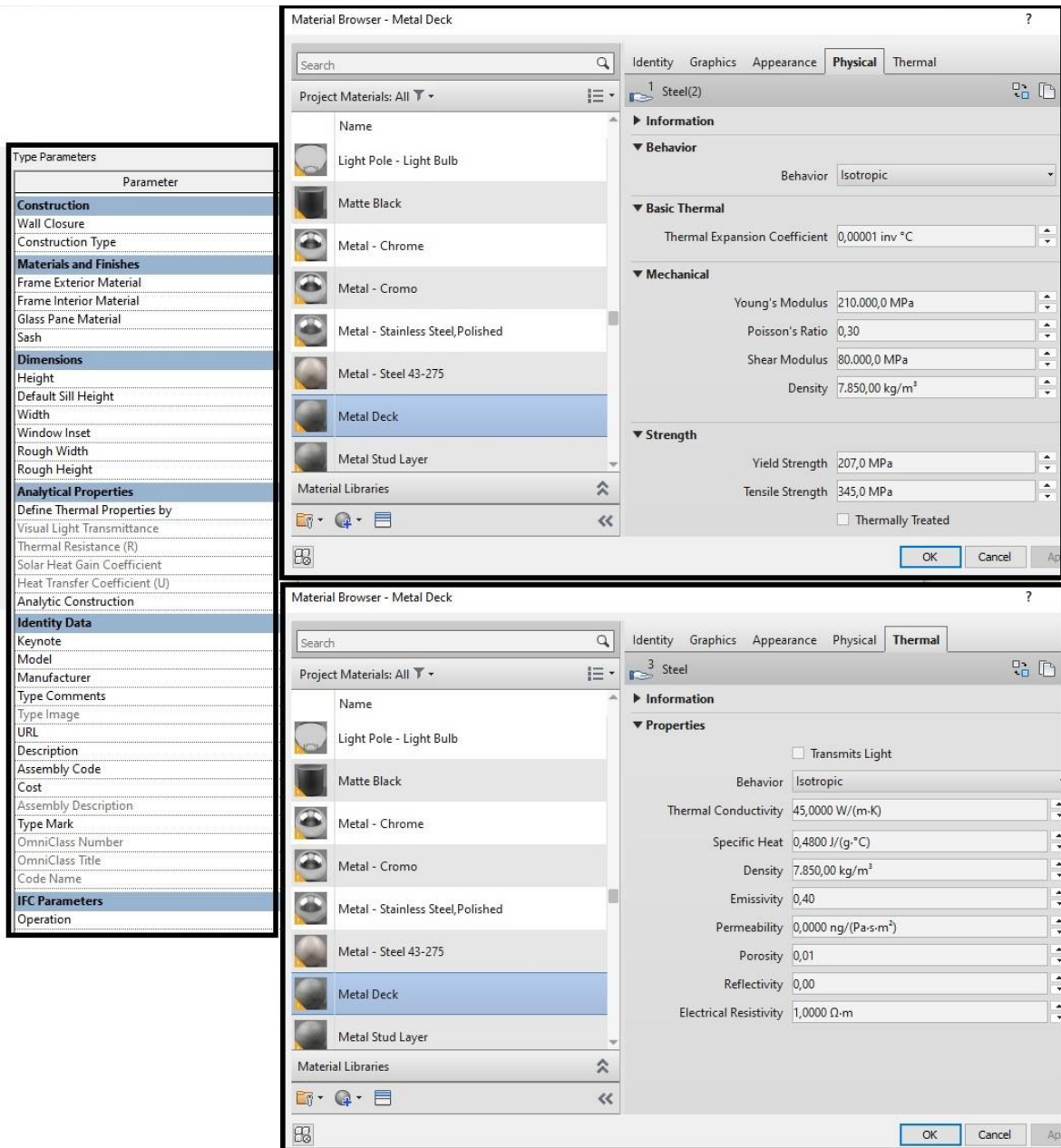
Εικόνα 18. Κάτοψη ισογείου του πιλοτικού κτιρίου

Αρχικά στο περιβάλλον του Revit ορίστηκαν τα επίπεδα (levels) πάνω στα οποία εδράζεται ο κάθε όροφος με υψομετρική διαφορά τριών μέτρων μεταξύ τους. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το δάπεδο έδρασης της κατασκευής και από το χαμηλότερο στο υψηλότερο επίπεδο “χτίστηκε” η κατασκευή χρησιμοποιώντας αντικείμενα από τις ομάδες υλικών του προγράμματος. Πρώτα τα εξωτερικά και τα εσωτερικά χωρίσματα και στη συνέχεια τα εξωτερικά και εσωτερικά ανοίγματα (θύρες, παράθυρα). Τέλος, σχεδιάστηκαν οι εσωτερικές λεπτομέρειες του κτιρίου (τα είδη υγιεινής, οι ντουλάπες, τα έπιπλα, τα ηλεκτρικά είδη, κλπ) και οι εξωτερικές λεπτομέρειες του κτιρίου (ηλιακοί συλλέκτες, μπαλκόνια, σκαλοπάτια, περιβάλλον χώρος).

Κάθε κατασκευαστικό αντικείμενο που χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό του κτιρίου, επεξεργάστηκε και ενημερώθηκε έτσι ώστε να περιλαμβάνει εντός των χαρακτηριστικών του στοιχεία για τη γεωμετρία του, την υφή του, τη σύστασή του, την όψη του, κλπ. Η εικόνα αυτών των γενικών, αλλά και των πιο ειδικών χαρακτηριστικών που δύναται να συμπληρωθούν και να φέρουν τις πληροφορίες



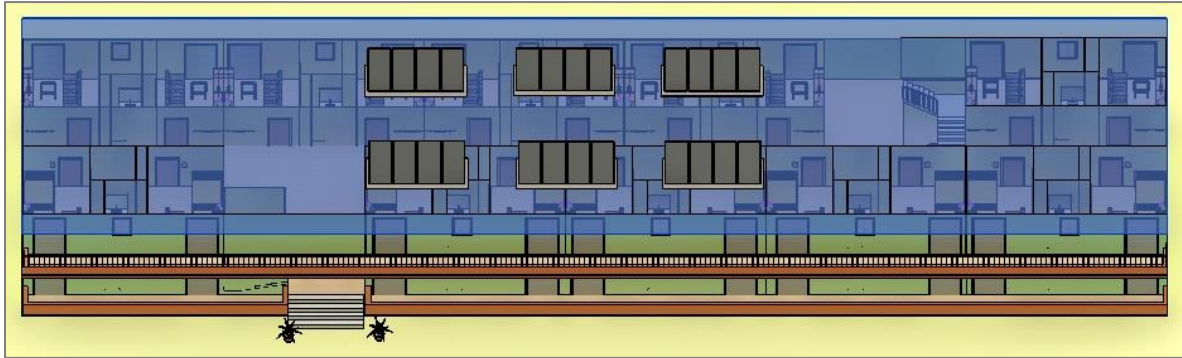
των κατασκευαστικών μερών του κτιρίου στη βάση δεδομένων του Revit φαίνονται ενδεικτικά για ένα υλικό στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19. Γενικά και ειδικά χαρακτηριστικά ενός ενδεικτικού κατασκευαστικού τμήματος

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται το μοντέλο του κτιρίου που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Revit.

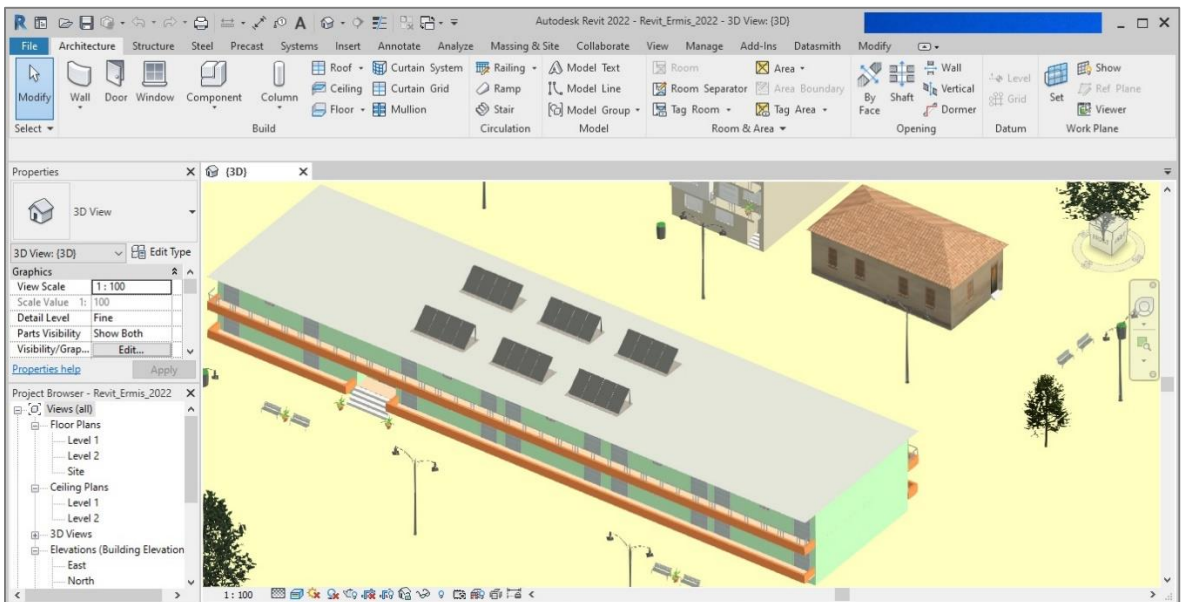




Εικόνα 20. Εσωτερικοί χώροι του κτιρίου



Εικόνα 21. Δυτική & βορειοδυτική όψη του κτιρίου

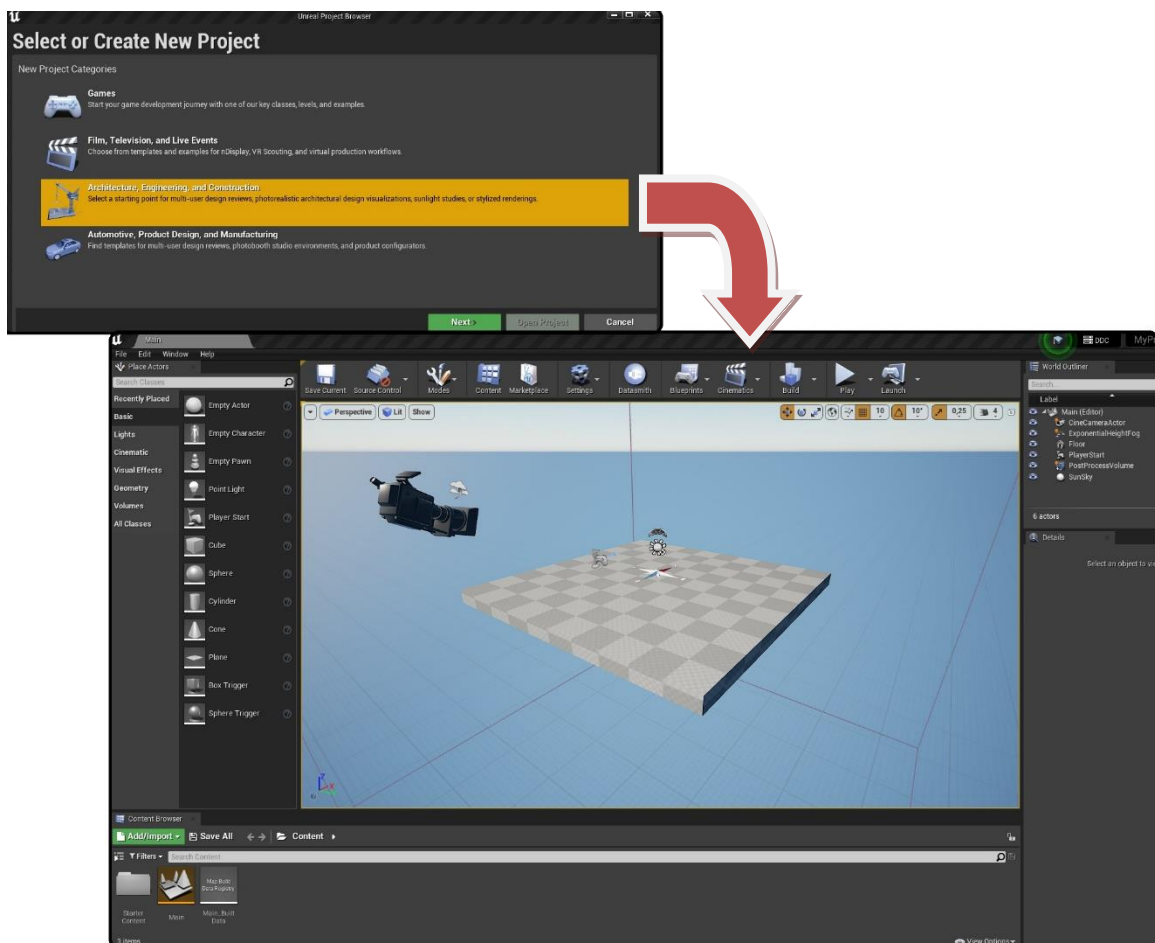


Εικόνα 22. Γενική εξωτερική εικόνα του κτιρίου

### 4.3 Εφαρμογή τεχνολογίας DTs στο κτιριακό μοντέλο

Για την υλοποίηση του DT μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Unreal Engine 4.27 και ειδικότερα η εφαρμογή του για αρχιτεκτονικό σχέδιο και κατασκευές (Architecture, Engineering, and Construction). Το συγκεκριμένο πρόγραμμα επιλέχθηκε καθώς τα περισσότερα προγράμματα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία DTs βρίσκονται ακόμα σε demo μορφές και ερευνητικό στάδιο και δεν έχουν δοθεί στην αγορά για τους χρήστες.

Επιλέγοντας την εφαρμογή για το αρχιτεκτονικό σχέδιο, το αρχικό περιβάλλον του προγράμματος περιέχει μόνο κάποιες βασικές ρυθμίσεις γεωμετρίας, προσανατολισμού, φωτισμού και βίντεο, και η εικόνα του εν λόγω περιβάλλοντος φαίνεται ως κάτωθι:



Εικόνα 23. Αρχικό περιβάλλον προγράμματος Unreal Engine

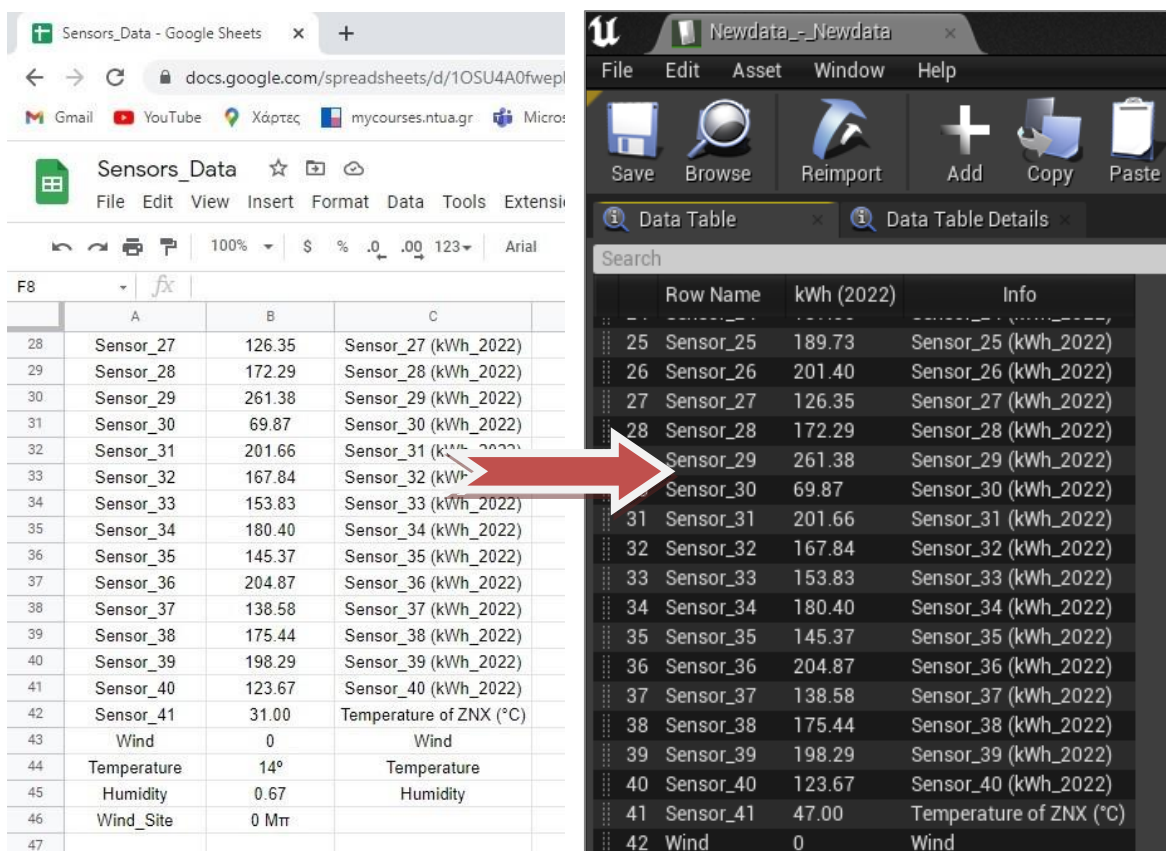


Τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας και τροφοδοτούν το μοντέλο μας είναι η κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος κάθε δωματίου σε kWh και η θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης του boiler του κτιρίου σε °C. Σε κάθε δωμάτιο υπάρχει ένας σένσορας που μετράει την ηλεκτρική κατανάλωση και μεταβιβάζει μέσω κλειστού συστήματος τηλεμετρίας τα δεδομένα σε υπολογιστή σε αρχείο μορφής .csv (comma-separated values file), ενώ αντίστοιχα μεταβιβάζονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας για το ζεστό νερό χρήσης.

Το αρχείο με τις ανωτέρω μετρήσεις το συγχρονίζουμε με ένα αρχείο google spreadsheet, ώστε τα εν λόγω δεδομένα να είναι προσβάσιμα και συνακόλουθα αξιοποιήσιμα από οποιοδήποτε υπολογιστή. Έπειτα ρυθμίζουμε το spreadsheet αρχείο ώστε να εξάγει αυτόματα τα τρέχοντα δεδομένα σε αρχείο μορφής .csv και συγχρονίζουμε εκ νέου το καινούργιο αρχείο μας με το αντίστοιχο αρχείο που έχουμε αποθηκευμένο στον google drive δίσκο μας. Με αυτή την αλληλουχία καταφέρνουμε να έχουμε όλα μας τα αρχεία πάντα συγχρονισμένα.

Τέλος, ρυθμίζουμε το spreadsheet αρχείο μας ώστε να αντλεί αυτόματα μετεωρολογικά στοιχεία για την περιοχή που βρίσκεται το κτίριό μας μέσω της σελίδας [www.okairos.gr](http://www.okairos.gr), και πιο συγκεκριμένα τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία περιβάλλοντος, καθώς και την ένταση του αέρα. Ο μετεωρολογικός σταθμός της πόλης λειτουργεί σε πολύ μικρή απόσταση από το κτίριο κι έτσι τα στοιχεία είναι αρκετά αξιόπιστα. Για να απομονώσουμε μόνο τα στοιχεία που θέλουμε από την ιστοσελίδα, χρησιμοποιούμε την αντίστοιχη εντολή Javascript, η οποία εισάγει στο Googlesheet μόνο τις αριθμητικές τιμές που χρειαζόμαστε και ανανεώνεται αυτόματα κάθε 15 λεπτά ώστε να έχουμε πάντα διαθέσιμα τα τρέχοντα δεδομένα.

Το αρχείο που προκύπτει, έπειτα από τις απαραίτητες ρυθμίσεις, εισάγεται αυτόματα στο πρόγραμμα Unreal Engine και επανεισάγεται κάθε φορά που γίνονται αλλαγές στα δεδομένα μας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24. Google Spreadsheet με δεδομένα από σένσορες και μετεωρολογικά δεδομένα και εισαγωγή αυτών των δεδομένων στο Unreal Engine

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε την εφαρμογή Datasmith που την εγκαθιστούμε και στα δύο προγράμματα και έτσι μπορούμε να τα καταστήσουμε συμβατά. Οι επιλογές που μας δίνει η εφαρμογή Datasmith στο Revit είναι είτε να κατεβάσουμε όλα τα χαρακτηριστικά του σχεδιαστικού μοντέλου μας στατικά, είτε να τα συνδέσουμε - συγχρονίσουμε με το Unreal Engine. Και στις δύο περιπτώσεις τα αρχεία που εξάγονται από το Revit, περιλαμβάνουν το σύνολο των ιδιοτήτων του σχεδίου μας, δηλαδή τόσο Textures και Materials, όσο και Geometries για κάθε ένα από τα κατασκευαστικά τμήματα, κι έτσι διατηρούνται όλα τα στοιχεία για την υφή, το χρώμα, τις διαστάσεις και τα γενικότερα χαρακτηριστικά των υλικών του κτιρίου μας. Η μόνη διαφορά είναι ότι αν συγχρονίσουμε τα δύο προγράμματα, όποια σχεδιαστική αλλαγή κάνουμε στο μοντέλο μας στο Revit, θα πραγματοποιείται αυτόματα και στο Unreal Engine, ενώ στην αντίθετη περίπτωση που θα κατεβάσουμε τα στατικά Datasmith αρχεία, τα δύο προγράμματα δεν θα αλληλεπιδρούν.



Εισάγοντας λοιπόν τα αρχεία του Revit στο Unreal Engine, και χρησιμοποιώντας παράλληλα μία πανοραμική φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής για να δημιουργήσουμε τον περιβάλλοντα θόλο, έχουμε το αποτέλεσμα που φαίνεται στις κάτωθι Εικόνες 25 & 26.



Εικόνα 25. Τρισδιάστατο μοντέλο του κτιρίου στο Unreal Engine



Εικόνα 26. Τρισδιάστατο μοντέλο του κτιρίου στο Unreal Engine



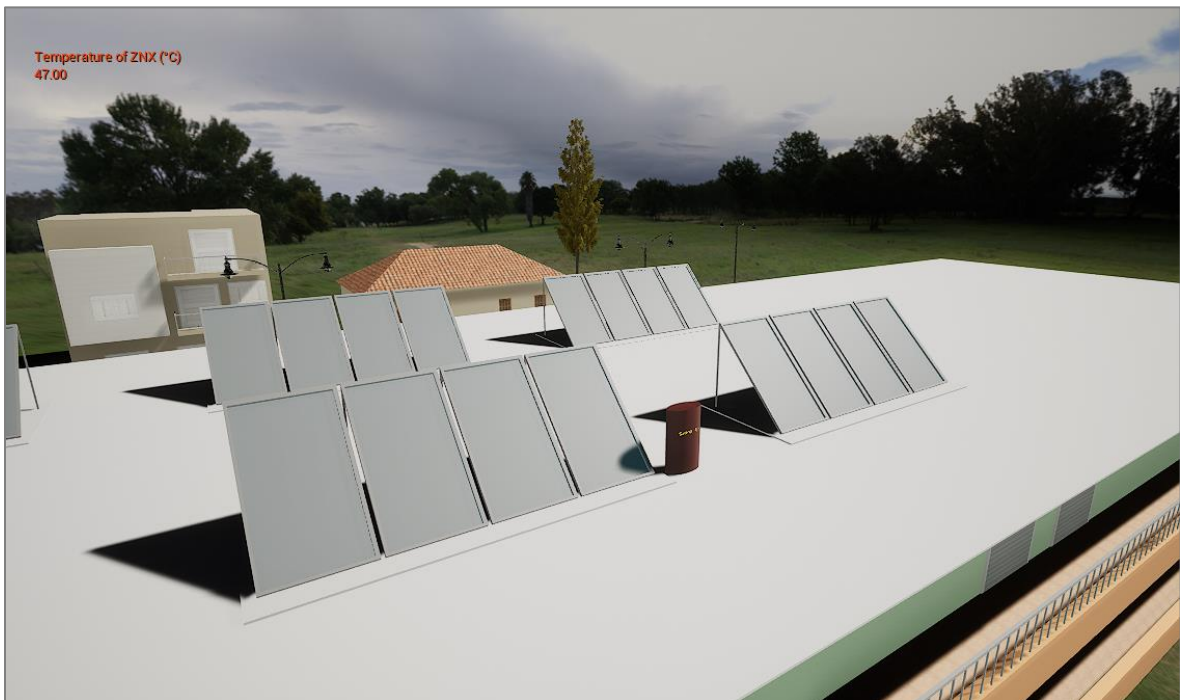
Στη συνέχεια, για να αποτυπώνονται τα δεδομένα που έχουμε από τους σένσορες κάθε φορά που θέλουμε στην κεντρική εικόνα του προγράμματός μας, πρέπει να δημιουργήσουμε ως κατασκευαστικά στοιχεία τους σένσορες και να επιλέξουμε τι ακριβώς, με ποιά μορφή και για πόση διάρκεια θα εμφανίζονται τα στοιχεία στην οθόνη μας. Αφού σχεδιάσουμε τους σένσορές μας, τους τοποθετούμε εντός του μοντέλου μας και κάθε φορά που τους επιλέγουμε κλικάροντάς τους, ενημερωνόμαστε για τις τρέχουσες μετρήσεις τους. Οι μορφή που επιλέξαμε να έχουν οι σένσορες και οι εντολές (μέσω Blueprints) που χρησιμοποιήσαμε για να εξάγουμε τα στοιχεία τους, φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 27. Σένσορες που μας ενημερώνουν για την τρέχουσα θερμοκρασία και σχετική υγρασία του περιβάλλοντος χώρου



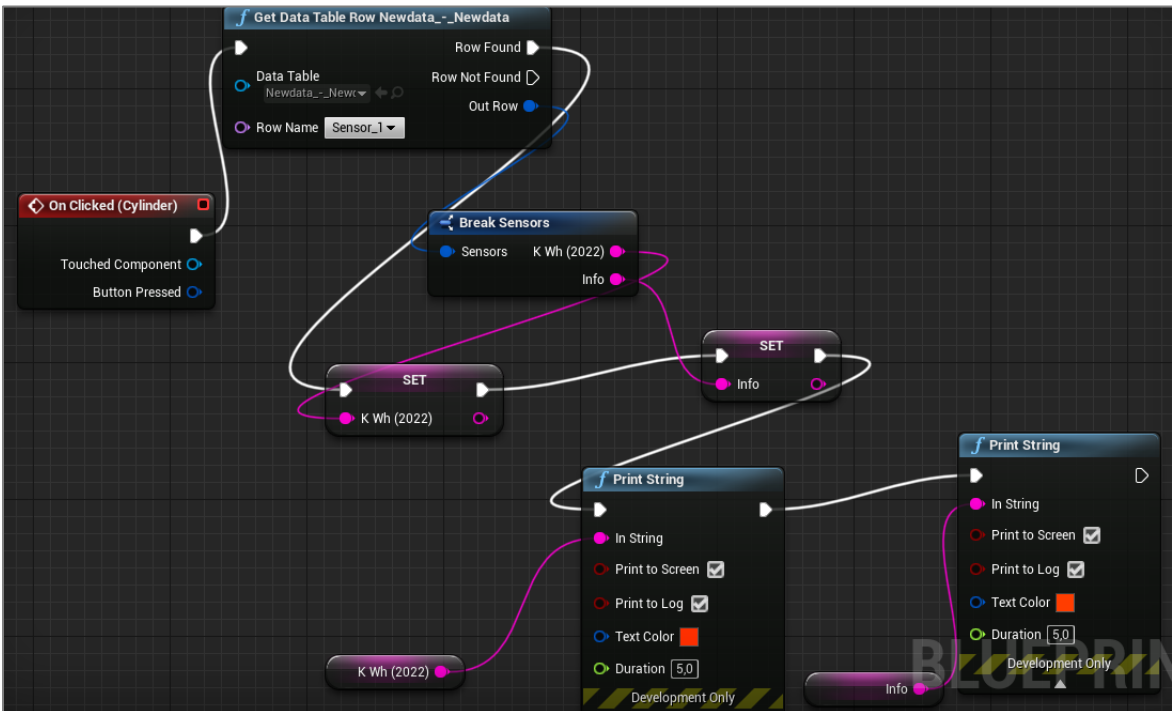
Εικόνα 28. Σένσoras που καταγράφει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε διαμέρισμα



Εικόνα 29. Σένσoras που καταγράφει τη θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης στο boiler του κτιρίου



Εικόνα 30. Σένσoras που μας ενημερώνει για την τρέχουσα ένταση του ανέμου στον περιβάλλοντα χώρο



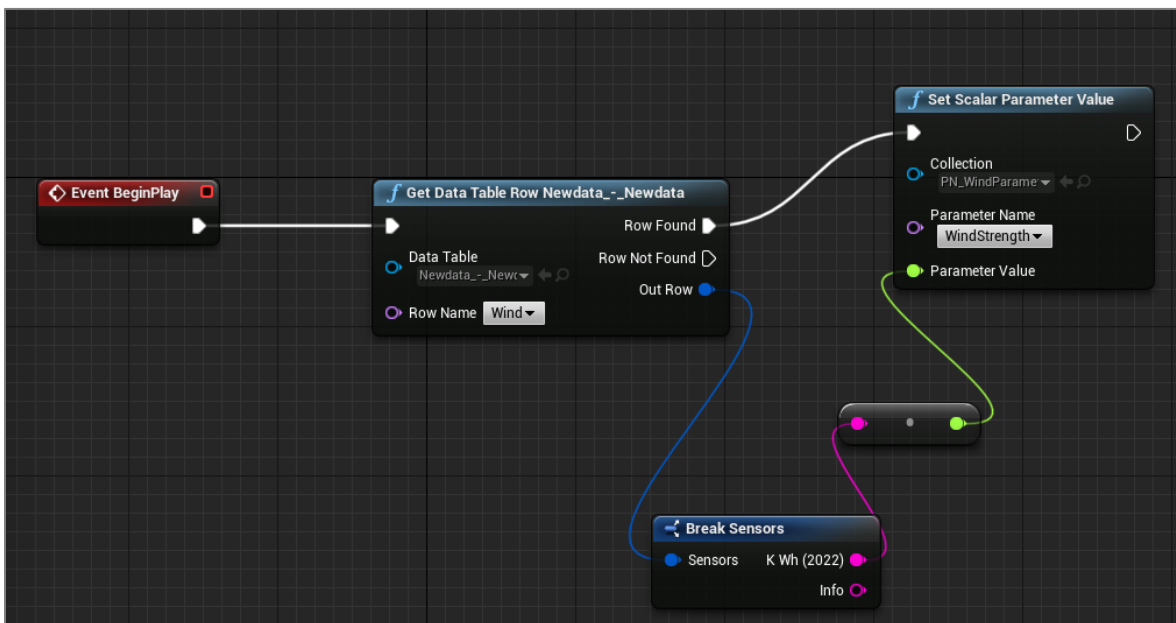
Εικόνα 31. Blueprint ώστε να εμφανίζονται τα δεδομένα μας στην οθόνη





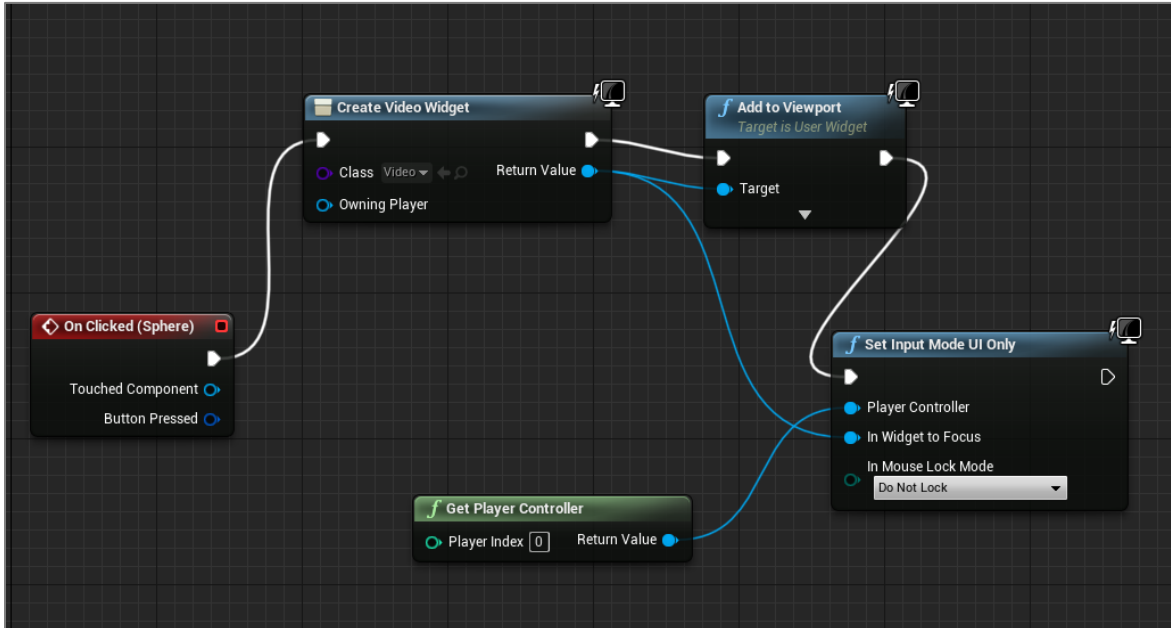
Κατ' αυτόν τον τρόπο κάθε φορά που επιλέγουμε κάποιον από τους σαράντα τέσσερις (44) σένσορες που έχουμε εγκατεστημένους στο ψηφιακό μας δίδυμο (40 σένσορες εντός των διαμερίσματος οι οποίοι μετράνε την κατανάλωση ρεύματος, 1 σένσορας που μετράει την θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης, και 3 σένσορες που μας δείχνουν την τρέχουσα περιβαλλοντική θερμοκρασία, σχετική υγρασία και ένταση του αέρα), εμφανίζονται τα αντίστοιχα δεδομένα στην οθόνη μας.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά στα δεδομένα της έντασης του αέρα που ανανεώνονται και επανεισάγονται κάθε ώρα στο μοντέλο μας, με την κάτωθι εντολή τα συσχετίζουμε με τα δέντρα που υπάρχουν στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου μας και αλληλεπιδρούν με τον εν λόγω παράγοντα. Δηλαδή όσο μεγαλώνει η ένταση του αέρα, τόσο περισσότερο παρατηρούμε να κινούνται τα δέντρα.



Εικόνα 32. Blueprint ώστε να αλληλεπιδρά η τρέχουσα ένταση του ανέμου με τα δέντρα

Τέλος, πέρα από όλα τα δεδομένα από τους σένσορες, εισάγουμε στο ψηφιακό μας δίδυμο Media & Audio αρχεία, καθώς και περιεχόμενο προσβάσιμο από Web Browser με την κάτωθι εντολή:



Εικόνα 33. Blueprint ώστε να εισάγουμε media & audio αρχεία στο μοντέλο μας

Κατ' αυτόν τον τρόπο όταν επιλέγουμε (κλικάρουμε) το αντίστοιχο σχεδιαστικό μας στοιχείο που αντιπροσωπεύει τη φυσική εγκατεστημένη κάμερα του κτιρίου μας, εμφανίζεται στο ψηφιακό μας δίδυμο εικόνα από αυτή, καθώς και ήχος από οποιοδήποτε εγκατεστημένο μικρόφωνο, με τη μοναδική προϋπόθεση οι εν λόγω συσκευές να επικοινωνούν με κάποιο modem, ώστε να είναι ουσιαστικά συνδεδεμένες με το διαδίκτυο. Το αρχείο εικόνας και ήχου, μπορεί να εμφανίζεται τόσο ως ξεχωριστό αναδυόμενο παράθυρο-πλαίσιο στην οθόνη μας, όσο και ως εικόνα που εμφανίζεται πάνω στην επιφάνεια κάποιου αντικειμένου (π.χ. οθόνη υπολογιστή ή τηλεόρασης) στο μοντέλο μας, όπως φαίνεται στις κάτωθι εικόνες:



Εικόνα 34. Εισαγωγή εικόνας και ήχου από εξωτερική κάμερα



Εικόνα 35. Εισαγωγή εικόνας και ήχου σε οθόνη εντός του κτιρίου

Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε επιλέγοντας κάποιο ηλεκτρονικό υπολογιστή του κτιρίου που έχει ήδη εγκατασταθεί εντός αυτού λογισμικό για απομακρυσμένη χρήση, να αποκτήσουμε πρόσβαση και να τον διαχειριζόμαστε μέσω του Unreal Engine. Έτσι, κατ' επέκταση μπορούμε να διαχειριστούμε και το σύνολο των έξυπνων συσκευών του κτιρίου που δύνανται να είναι συνδεδεμένες και να ελέγχονται μέσω του τοπικού ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Συμπερασματικά λοιπόν μέσω όλων των ανωτέρω διαδικασιών μπορούμε να εισάγουμε αυτόματα στο ψηφιακό μας δίδυμο απεριόριστα στοιχεία αριθμητικών δεδομένων που συλλέγουμε από οποιονδήποτε εγκατεστημένο στο κτίριο σένσορα, όπως και οποιαδήποτε media & audio δεδομένα από εγκατεστημένες κάμερες και μικρόφωνα, καθώς και να αποκτήσουμε πρόσβαση σε οποιοδήποτε ηλεκτρονικό μέσο του κτιρίου έχουμε ρυθμίσει τη λειτουργία της απομακρυσμένης πρόσβασης.

Μ' αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε σε 3d περιβάλλον μία συνεχή παρακολούθηση του κτιρίου, όσον αφορά στην κατανάλωση ρεύματος, το οποίο δύναται να μας βοηθήσει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση του ενεργειακού αποτυπώματος του κτιρίου. Προς την ίδια κατεύθυνση συνδράμει και η δυνατότητα να γνωρίζουμε την τρέχουσα θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης, ώστε να περιοριστεί όταν δεν είναι απαραίτητη, η λειτουργία της ηλεκτρικής αντίστασης του boiler.



## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 Συμπεράσματα από τη χρήση της τεχνολογίας BIM

Η χρήση της τεχνολογίας BIM στον προγραμματισμό, το σχεδιασμό και τον έλεγχο ενός κατασκευαστικού έργου, συμβάλλει στην εξάλειψη των ανεπαρειών στην κατασκευαστική διαδικασία. Διευκολύνεται η επικοινωνία και η αλληλεπίδραση όλων των εμπλεκόμενων και οι πληροφορίες του έργου ανανεώνονται άμεσα χωρίς να κινδυνεύουμε να χαθούν από τη μία φάση στην άλλη, καθώς όλοι δουλεύουν πάνω στο ίδιο μοντέλο. Η λήψη αποφάσεων γίνεται έγκαιρα εξοικονομώντας τόσο χρόνο όσο και χρήμα, μειώνοντας παράλληλα τις πιθανότητες λαθών και καθυστερήσεων.

Ωστόσο, η υλοποίηση ενός κατασκευαστικού μοντέλου με τη χρήση της τεχνολογίας BIM και η χρήση όλων των εργαλείων και εφαρμογών αυτής για την ακριβή κοστολόγηση και τον προγραμματισμό του έργου, είναι απαιτητικές διαδικασίες, οι οποίες απαιτούν την εκπαίδευση και την εμπάθунση σε αυτές όλων των εμπλεκόμενων, καθώς και σε ορισμένες περιπτώσεις την προμήθεια νέου εξοπλισμού. Μόνο έπειτα από την απαραίτητη εκπαίδευση και τη μαζική υιοθέτηση της BIM από τον κατασκευαστικό κλάδο, θα μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε πλήρως όλα τα οφέλη της και να ξεπεράσουμε τα προβλήματα ασυμβατότητας μεταξύ των διαφορετικών λογισμικών.

### 5.2 Συμπεράσματα από τη χρήση της τεχνολογίας DTs

Η χρήση της τεχνολογίας DTs στα κατασκευαστικά έργα μας δίνει την ευκαιρία να αξιοποιήσουμε έναν τεράστιο όγκο πολυεπίπεδων δεδομένων από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού και κατασκευής του έργου μέχρι και τη φάση λειτουργίας αυτού. Το ψηφιακό δίδυμο είναι δυναμικό και αναπτύσσεται παράλληλα με την εξέλιξη του φυσικού μοντέλου σε όλο τον κύκλο ζωής αυτού.

Η προσομοίωση και η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο του κτιρίου, μας βοηθάει να κατανοήσουμε την κατάσταση αυτού, να εντοπίσουμε άμεσα



προβλήματα, και να επέμβουμε συντηρώντας τα προληπτικά. Η ψηφιακή αυτή πρόσβαση στις πληροφορίες και τα δεδομένα του κτιρίου γίνεται αδιάκοπα, σε σύγκριση με αντίστοιχους περιοδικούς ελέγχους που πραγματοποιούνται με φυσική παρουσία, κι έτσι μειώνονται δραστικά οι πιθανότητες μη εντοπισμού κάποιας βλάβης στην κατασκευή και τον εξοπλισμό αυτής.

Όσον αφορά στις λειτουργίες του κτιρίου, η χρήση της τεχνολογίας των DTs, μπορεί να συνεισφέρει δραστικά στο ενεργειακό αποτύπωμα αυτού, εξοικονομώντας ενέργεια, ενώ παράλληλα δημιουργεί ένα πιο αποδοτικό και φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον, διατηρώντας τα επίπεδα υγρασίας, θερμοκρασίας και ποιότητας αέρα στα θεμιτά επίπεδα. Με τη συνεχιζόμενη εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης, η ορθότερη και αποδοτικότερη λειτουργία των εξοπλισμών και των συστημάτων των κατασκευών θα αυτοματοποιηθεί σχεδόν απόλυτα και έτσι θα είναι σε θέση ανά πάσα στιγμή να εξετάζει τα νέα δεδομένα και να δρα ανάλογα ανά περίπτωση.

Η συνεχής παρακολούθηση της κατασκευής σε πραγματικό χρόνο έχει πολλά πλεονεκτήματα ακόμα κι από το στάδιο του εργοταξίου, καθώς μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγχουμε ότι οι εργασίες επιτελούνται με βάση τη μελέτη και το σχεδιασμό μας, ενώ παράλληλα ελέγχουμε άμεσα την ορθή κατανομή και χρήση των υλικών, του εξοπλισμού και των μέσων.

Επιπρόσθετα, η δυνατότητα συνεχής παρακολούθησης του κτιρίου μέσω των εγκατεστημένων καμερών και μικροφώνων, θωρακίζει την ασφάλεια της κατασκευής. Αρχικά, στο στάδιο του εργοταξίου καθίσταται δυνατό στον επιβλέποντα του κτιρίου να εντοπίζει εργαζόμενους που δραστηριοποιούνται σε επικίνδυνους χώρους ή χρησιμοποιούν επικίνδυνα υλικά χωρίς τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας, ώστε να προλαμβάνονται ατυχήματα. Στον υπόλοιπο κύκλο ζωής του κτιρίου, μέσω της εγκατάστασης κατάλληλων αισθητήρων δύναται να αναπτυχθεί ένα σύστημα έγκαιρης ειδοποίησης που θα ειδοποιεί τους χρήστες για διάφορους κινδύνους, όπως την ύπαρξη φωτιάς, την ποιότητα του αέρα, την παραβίαση κάποιου χώρου κλπ.



Συνοπτικά, τα κύρια οφέλη χρήσης των ανωτέρω τεχνολογιών έχουν συγκεντρωτικά ως κάτωθι:

- Κατασκευή ποιοτικότερων κατασκευών, καθώς καθίσταται πιο εύκολη η επίβλεψη και η κατά γράμμα τήρηση της μελέτης και του γενικότερου σχεδιασμού του έργου, ενώ παράλληλα επιβοηθάται η ορθή λήψη αποφάσεων, καθώς και οι προληπτικές επεμβάσεις και η στοχευμένη συντήρηση.
- Κτιριακές υποδομές με χαμηλότερο κόστος, κυρίως μέσω της δραστηκής μείωσης του χρόνου πέρατος τόσο της μελέτης, όσο και της κατασκευής του κτιρίου.
- Βελτίωση του ενεργειακού αποτυπώματος των κτιριακών κατασκευών μέσω της συνεχής παρακολούθησης των καταναλώσεων και τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης.
- Ασφαλέστερες υποδομές, μέσω συστημάτων 24ωρης παρακολούθησης και συστημάτων άμεσης ειδοποίησης για την ύπαρξη κάποιου πιθανού κινδύνου.

Τα ανωτέρω συνδράμουν στην επίτευξη κάποιων από τους 17 στόχους του ΟΗΕ που ενέκριναν ομόφωνα οι παγκόσμιοι ηγέτες το 2015 και αποτελούν την Ατζέντα 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη. Οι στόχοι για τη βιώσιμη ανάπτυξη είναι το μονοπάτι που θα μας οδηγήσει σε ένα κόσμο δικαιότερο, και ευημερούντα και σε έναν πιο υγιή πλανήτη. Οι εν λόγω στόχοι φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 36. Οι 17 στόχοι της Ατζέντας 2030 του ΟΗΕ

Ο 1ος Στόχος για την εξάλειψη της φτώχειας, επιδιώκει έως το 2030, μεταξύ πολλών άλλων, την πρόσβαση όλων και ιδίως των οικονομικά ευάλωτων ομάδων, στην ιδιοκτησία. Η μείωση του κόστους κατασκευής των υποδομών μέσω της μαζικότερης υιοθέτησης της BIM και των DTs, θα συνδράμει προς αυτή την κατεύθυνση.

Ο 7ος Στόχος για φθηνή και καθαρή ενέργεια καθώς και ο 12ος Στόχος για υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή, επιδιώκουν μεταξύ άλλων, μέχρι το 2030 το διπλασιασμό του παγκόσμιου ποσοστού βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας και την υπεύθυνη κατανάλωση ενέργειας. Σε αυτούς τους στόχους θα βοηθήσει η χρήση των τεχνολογιών BIM και DTs, καθώς βελτιώνουν το ενεργειακό αποτύπωμα των κτιρίων.

Ο 9ος Στόχος που πραγματεύεται τους κλάδους της βιομηχανίας, της καινοτομίας και των υποδομών, επιδιώκει τη δημιουργία ποιοτικών, αξιόπιστων, και ανθεκτικών κατασκευών, για τη στήριξη της ανθρώπινης ευημερίας. Και σ' αυτόν τον στόχο θα συνδράμει η BIM και τα ψηφιακά δίδυμα.





Και τέλος, ο 11ος Στόχος, έχει να κάνει με τις βιώσιμες πόλεις και κοινότητες, επιδιώκοντας μεταξύ άλλων τη διασφάλιση της πρόσβασης όλων σε ασφαλή στέγαση και βασικές υπηρεσίες και παράλληλα στη μείωση του δυσμενούς κατά κεφαλήν περιβαλλοντικού αντίκτυπου των πόλεων. Η συνεισφορά της BIM και των DTs θα είναι σημαντική και προς την επίτευξη αυτού του στόχου, μέσω των ευνοϊκότερων συνθηκών που παρέχουν προς τη δημιουργία ασφαλέστερων κτιριακών εγκαταστάσεων και τη βελτίωση του ενεργειακού αποτυπώματος των κτιρίων.



### Βιβλιογραφία - Αναφορές

- EU BIM Task Book (2017)
- Accenture Demystifying Digitization (2016)
- Migilinskas et al (2013). The Benefits, Obstacles and Problems of Practical Bim Implementation.
- Smith P. (2014). BIM & the 5D project cost manager.
- Φαρμάκης, Δ. (2019). Building Information Modeling (BIM): Ορισμός, τα οφέλη και οι εφαρμογές.
- Wang et al (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment.
- Hardi et al (2015). A review of the benefits, challenges and key drivers in BIM implementation within the UK construction industry.
- Azhar S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry.
- Publicly Available Specifications - PAS 1192-2&3.
- BS EN ISO 19650.
- European Cyber Security Organisation (ECSO) Survey (2020).
- Perez Sanchez et al (2017). From CAD to BIM: A New Way to Understand Architecture.
- Panaitescu R.M. (2014). Building Information Modeling: Towards a structured implementation process in an engineering organization.
- Sacks et al (2020). Construction with digital twin information systems.
- Glaessgen and Stargel (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles.
- Grieves (2003). PLM--beyond lean manufacturing.
- Camposano et al (2021). Seven Metaphors to Understand Digital Twins of Built Assets.
- Tuegel et al (2011). Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin.



- Grieves and Vickers (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems.
- Tao et al (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data.
- Ozcan-Deniz (2018). Construction management education in cyberspace: a critical review and analysis.
- Geismann and Bodden (2020). A systematic literature review of model-driven security engineering for cyber–physical systems.
- Gill (2006). From Vision to Reality: Cyber-Physical Systems.
- Kim et al (2010). Substrate integrate waveguide quasi Yagi antenna using SIW-to-CPS transition for low mutual coupling.
- Lee et al (2016). System of Systems Approach to Formal Modeling of CPS for Simulation-Based Analysis.
- Wang et al (2015). Cyber-physical systems for water sustainability: challenges and opportunities.
- Tao et al (2019). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison.
- Adat et al (2018). Economic incentive based solution against distributed denial of service attacks for IoT customers.
- Chan J. (2014). Big Data Customer Knowledge Management.
- Bangui et al (2018). Exploring Big Data Clustering Algorithms for Internet of Things Applications.
- Rosen et al (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing.
- Kan and Anumba (2019). Digital Twins as the Next Phase of Cyber-Physical Systems in Construction.
- Qi et al (2019). Enabling technologies and tools for digital twin.
- Boje et al (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research.



- Deng et al (2021). From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry.
- Ponds et al (2018). Aggregator of Demand Response for Renewable Integration and Customer Engagement: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats.
- Sun and Liu (2021). Research on Intelligent Dispatching System Management Platform for Construction Projects Based on Digital Twin and BIM Technology.
- Wang et al (2022). Deep learning for assessment of environmental satisfaction using BIM big data in energy efficient building digital twins.
- Shahzad et al (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges.
- Boishakov et al (2020). Digital twins of complex technical systems for management of built environment.
- Lu et al (2019). Moving from building information models to digital twins for operation and maintenance.
- Yitmen et al (2021). An Adapted Model of Cognitive Digital Twins for Building Lifecycle Management.
- Juniper Research (Smart Cities: Key technologies, Environmental impact & market forecast 2022-2026).
- Policy Framework for Sustainable Real Estate Markets (United Nations).
- The future of BIM: Digital transformation in the UK construction and infrastructure sector (Royal Institution of Chartered Surveyors - RICS).
- Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Technical Report (2017).
- Γωνιανάκης Π.Β., «Παρουσίαση της μεθόδου BIM και πρακτική εφαρμογή της για τον προγραμματισμό έργου, με τη χρήση του προγράμματος Synchro», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2014.
- Σιάννα Κ., «Διερεύνηση της χρήσης της τεχνολογίας BIM στη διαχείριση κτηματολογικής πληροφορίας», Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό



Πρόγραμμα Γεωπληροφορικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2016.

- Ακριτίδου Κ., «Δημιουργία 5D εργαλείου αιεφόρου διαχείρισης αστικής γης με την αξιοποίηση της τεχνολογίας BIM», Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Γεωπληροφορικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2017.
- Κραβαρίτη Μ.Ε., «Διαχείριση χωρικής πληροφορίας κτηρίου σε BIM και ένταξη αυτής σε κτηματολογική βάση δεδομένων», Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Γεωπληροφορικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2020.
- Λιανός Ν., «Ψηφιακά Δίδυμα στις κατασκευές: Βιβλιογραφική επισκόπηση κι ανάπτυξη μεθοδολογίας για το σχεδιασμό, κατασκευή και διαχείριση κτιρίων», Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Διαχείρισης Τεχνικών Έργων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, Σεπτέμβριος 2021.
- Μούντριχας Γ., «Τα οφέλη της χρήσης της BIM στην κατασκευή έργων υποδομής», Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Διαχείρισης Τεχνικών Έργων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Αθήνα, Ιούλιος 2021.
- Δομουκτσής Δ., «Η χρήση του BIM στον αρχικό σχεδιασμό και στις μελλοντικές ανακαινίσεις κτιρίων», Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Διαχείρισης Τεχνικών Έργων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, Ιούλιος 2019.

#### Ιστοσελίδες

- [www.united-bim.com](http://www.united-bim.com)
- [www.e-zigurat.com](http://www.e-zigurat.com)
- [www.avineolab.com](http://www.avineolab.com)
- [www.thenbs.com](http://www.thenbs.com)
- [www.cadlab.gr](http://www.cadlab.gr)



- [www.b2green.gr](http://www.b2green.gr)
- [www.fig.net](http://www.fig.net)
- [www.cadlab.gr](http://www.cadlab.gr)
- [www.bim-level2.org](http://www.bim-level2.org)
- [www.michanikos-online.gr](http://www.michanikos-online.gr)
- [www.buildipedia.com](http://www.buildipedia.com)
- [www.link.springer.com](http://www.link.springer.com)
- [www.cadtobim.com](http://www.cadtobim.com)