



Μεταπτυχιακό: Διαχείριση τεχνικών έργων

**Θέμα: Χρησιμότητα και αποτελεσματικότητα των BIM
προγραμμάτων στον κατασκευαστικό κλάδο**

Ονοματεπώνυμο

Νικόλαος Μηλιδάκης

Καθηγητής

Κωνσταντίνος Δημάκος

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πολυτεχνική σχολή ΠΑ.Δ.Α

03/07/2026

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη χρησιμότητα και την αποτελεσματικότητα των προγραμμάτων Building Information Modeling (BIM) στον κατασκευαστικό κλάδο, με έμφαση στη συμβολή τους στον σχεδιασμό, στον συντονισμό, στη διαχείριση χρόνου και κόστους και στη βελτίωση της ποιότητας των τεχνικών έργων. Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο το BIM λειτουργεί ως ψηφιακή μεθοδολογία οργάνωσης πληροφοριών και ως εργαλείο υποστήριξης της διοίκησης τεχνικών έργων. Η μεθοδολογία βασίστηκε σε ποιοτική βιβλιογραφική ανασκόπηση ελληνικών και διεθνών πηγών, σε ανάλυση εμπειρικών μελετών για την αποδοτικότητα του BIM και σε μελέτη περίπτωσης του φράγματος Βαλσαμιώτη στα Χανιά. Στο case study περιγράφηκε η εφαρμογή BIM μέσα από την ανάπτυξη τρισδιάστατου μοντέλου, την επιλογή LOD 200, τη χρήση Revit και Civil 3D, τη σύνδεση του μοντέλου με χρονοδιάγραμμα μέσω Navisworks και Microsoft Project και την εξαγωγή ποσοτήτων μέσω 5D προμέτρησης και αναλύθηκαν τα θετικά αποτελέσματα της χρήσης BIM στην υπό μελέτη περίπτωση.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το BIM ενισχύει την οπτικοποίηση σύνθετων έργων, βελτιώνει τον χωρικό και χρονικό συντονισμό, υποστηρίζει την ακριβέστερη προμέτρηση και διευκολύνει τη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκομένων. Η περίπτωση του φράγματος ανέδειξε ιδιαίτερα τη δυνατότητα μετατροπής δισδιάστατων σχεδίων σε οργανωμένο πληροφοριακό μοντέλο, ικανό να υποστηρίζει την κατανόηση, την παρακολούθηση και τη διαχείριση του έργου. Παράλληλα, η ανάλυση ανέδειξε ότι η επιτυχής εφαρμογή απαιτεί κατάλληλη εκπαίδευση, τεχνολογική ετοιμότητα, διαλειτουργικότητα λογισμικών και σαφή οργάνωση των ροών εργασίας. Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν ότι η αξία του BIM αυξάνεται όταν η χρήση του εντάσσεται από τα πρώτα στάδια του έργου και συνδέεται με τις ανάγκες μελέτης, κατασκευής, κοστολόγησης και μελλοντικής λειτουργίας.

Η εργασία προτείνει συστηματική ενίσχυση των ψηφιακών δεξιοτήτων και πιλοτική αξιοποίηση BIM σε μεγάλα δημόσια έργα υποδομής, με έμφαση σε φράγματα και υδραυλικά συστήματα σύγχρονης τεχνικής διαχείρισης. Συμπερασματικά, το BIM αποτελεί σημαντικό εργαλείο εκσυγχρονισμού του κατασκευαστικού κλάδου, καθώς συμβάλλει στην αποδοτικότερη αξιοποίηση

δεδομένων, στη μείωση τεχνικών αστοχιών και στην ολοκληρωμένη διαχείριση του κύκλου ζωής των έργων.

Λέξεις κλειδιά: Building Information Modeling, τεχνικά έργα, φράγμα Βαλσαμιώτη

Abstract

This thesis examines the usefulness and effectiveness of Building Information Modeling programs in the construction industry, with emphasis on their contribution to planning, coordination, time and cost management and to improving the quality of technical projects. The purpose of the work is to investigate the way in which BIM functions as a digital information organization methodology and as a tool to support the management of technical projects. The methodology was based on a qualitative literature review of Greek and international sources, on an analysis of empirical studies on the efficiency of BIM and on a case study of the Valsamiotis dam in Chania. The case study examined the BIM application through the development of a 3D model, the selection of LOD 200, the use of Revit and Civil 3D, the connection of the model with a schedule through Navisworks and Microsoft Project and the extraction of quantities through 5D pre-measurement.

The results show that BIM enhances the visualization of complex projects, improves spatial and temporal coordination, supports more accurate pre-measurement and facilitates collaboration between those involved. The dam case particularly highlighted the possibility of converting two-dimensional drawings into an organized information model, capable of supporting the understanding, monitoring and management of the project. At the same time, the analysis revealed that successful implementation requires appropriate training, technological readiness, software interoperability and clear organization of workflows. The findings confirm that the value of BIM increases when its use is integrated from the early stages of the project and is linked to the needs of design, construction, costing and future operation.

The work proposes a systematic strengthening of digital skills and pilot use of BIM in large public infrastructure projects, with an emphasis on dams and hydraulic systems of modern technical management. In conclusion, BIM is an important tool for modernizing the construction industry, as it contributes to more efficient data utilization, the reduction of technical failures and the integrated management of the project life cycle.

Keywords: Building Information Modeling, technical projects, Valsamiotis dam

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	4
Ευχαριστίες	6
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Συντομογραφιών	10
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	12
1.1 Αντικείμενο και σημασία του θέματος	12
1.2 Ερευνητικό πρόβλημα	12
1.3 Σκοπός της εργασίας	13
1.4 Ερευνητικοί στόχοι.....	13
1.5 Ερευνητικά ερωτήματα	13
1.6 Μεθοδολογική προσέγγιση	14
1.7 Δομή της εργασίας.....	14
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό πλαίσιο του BIM	16
2.1 Η έννοια του BIM	16
2.2 Ιστορική εξέλιξη του BIM	17
2.3 Βασικές αρχές και χαρακτηριστικά του BIM.....	29
2.4 Τα κυριότερα BIM λογισμικά και οι δυνατότητές τους	31
Κεφάλαιο 3: Χρησιμότητα και αποτελεσματικότητα των BIM προγραμμάτων	34
3.1 Οφέλη από την εφαρμογή του BIM	34
3.2 Δυσκολίες και προκλήσεις εφαρμογής	42
3.3 Διεθνείς εμπειρικές μελέτες για την αποδοτικότητα του BIM.....	48
Κεφάλαιο 4. Μελέτη περίπτωσης εφαρμογής BIM στο Φράγμα Βαλσαμιώτη.....	55
Συζήτηση.....	76
Συμπεράσματα και προτάσεις.....	79

Βιβλιογραφία	85
--------------------	----

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Το φράγμα Βαλσαμιώτη στα Χανια (Πηγή: https://www.ertnews.gr/perifereiakoi-stathmoi/chania/techniki-syskepsi-ston-o-a-k-gia-to-fragmento-valsamioti/)	58
Εικόνα 2. Άποψη του φράγματος Βαλσαμιώτη στα Χανια (Πηγή: https://www.facebook.com/photo/?fbid=949048768525731&set=pcb.949049481858993).	59
Εικόνα 3. Περιοχή φράγματος Βαλσαμιώτη (RCCDAMS, 2018).	59
Εικόνα 4. Αρχική επιφάνεια εδάφους (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).....	63
Εικόνα 5. Εκσκαφές θεμελίωσης και έργα εκτροπής (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).....	64
Εικόνα 6. Σήραγγες και στοές αποστράγγισης, στοά τσιμεντενέσεων, στοά εκκένωσης και υδροληψίας (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).....	64
Εικόνα 7. Βαθμιδωτός Μετωπικός υπερχειλιστής και λεκάνη ηρεμίας (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).....	65

Κατάλογος Συντομογραφιών

AEC: Architecture, Engineering and Construction

AECMA: Association européenne des constructeurs de matériel aérospatial

ANSI: American National Standards Institute

BDS: Building Description System

BIM: Building Information Modeling

BPM: Building Product Model

CAD: Computer Aided Design

CAE: Computer Aided Engineering

CAM: Computer Aided Manufacturing

CAM-I: Computer Aided Manufacturing International

CATIA: Computer Aided Three Dimensional Interactive Application

CIC: Computer Integrated Construction

CSEM: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique

DGN: DesiGN

DWG: Drawing

DXF: Drawing Exchange File

ΕΑΠ: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

ΕΠΕ: Εταιρεία Περιορισμένης Ευθύνης

EPFL: École Polytechnique Fédérale de Lausanne

GBM: Generic Building Model

GDL: Geometric Description Language

GIS: Geographic Information System

GLIDE: Graphical Language for Interactive Design

GMAP: Geometric Modeling Application

HTML: HyperText Markup Language

IAI: Industry Alliance for Interoperability

ICAM: Integrated Computer Aided Manufacturing

IDGN: Interactive Graphics Design System

IFC: Industry Foundation Classes

IGES: Initial Graphics Exchange Specification

ISO: International Organization for Standardization

ITC: IntelliCAD Technology Consortium
LOD: Level of Development
MDL: MicroStation Development Language
MEP: Mechanical Electrical and Plumbing
NBS: National Bureau of Standards
NBSIR: National Bureau of Standards Interagency Report
ODA: Open Design Alliance
PDES: Product Data Exchange Specification
PDDI: Product Definition Data Interface
PLM: Product Lifecycle Management
PTC: Parametric Technology Corporation
RACAD: Computer Aided Design Construction Council
RATAS: Computer Assisted Design of Buildings
RCC: Roller Compacted Concrete
RCCDAMS: Roller Compacted Concrete Dams
SCIA: Scientific Applications
SET: Standard d'Echange et de Transfer
SGML: Standard Generalized Markup Language
SPARC: Standards Planning and Requirements Committee
STEP: Standard for the Exchange of Product Model Data
VDA FS: Verband der Automobilindustrie Flachschnittstelle
VTT: Technical Research Center
W3C: World Wide Web Consortium
WBS: Work Breakdown Structure
XML: eXtensible Markup Language
aecXML: Architecture, Engineering and Construction XML
bcXML: Building and Construction XML
ceXML: Civil Engineering XML
3D: Three Dimensional
4D: Four Dimensional
5D: Five Dimensional
6D: Six Dimensional
7D: Seven Dimensional

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σημασία του θέματος

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη χρησιμότητα και την αποτελεσματικότητα των BIM προγραμμάτων στον κατασκευαστικό κλάδο, με έμφαση στον τρόπο με τον οποίο τα ψηφιακά αυτά εργαλεία ενισχύουν τον σχεδιασμό, τον συντονισμό, την παρακολούθηση και τη διαχείριση των τεχνικών έργων. Το Building Information Modeling αποτελεί μία σύγχρονη προσέγγιση οργάνωσης και αξιοποίησης πληροφοριών που συνδέονται με όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου, από τη σύλληψη και τη μελέτη έως την κατασκευή και τη λειτουργία (Sacks et al., 2018). Η σημασία του θέματος συνδέεται άμεσα με τις αυξανόμενες απαιτήσεις για ακρίβεια, ταχύτητα, ποιοτικό έλεγχο, ορθολογική διαχείριση πόρων και βιώσιμη ανάπτυξη στον τομέα των κατασκευών. Σε ένα περιβάλλον όπου η πολυπλοκότητα των έργων αυξάνεται συνεχώς, η χρήση BIM αναδεικνύεται ως βασικός μοχλός εκσυγχρονισμού, τεχνολογικής προόδου και οργανωτικής αναβάθμισης (Azhar, 2011).

1.2 Ερευνητικό πρόβλημα

Σήμερα, ο κατασκευαστικός κλάδος χαρακτηρίζεται από έντονη πολυπλοκότητα, εμπλοκή πολλών ειδικοτήτων, αυξημένες απαιτήσεις συντονισμού και ανάγκη συνεχούς ελέγχου του χρόνου, του κόστους και της ποιότητας. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, τα BIM προγράμματα προβάλλονται ως λύση υψηλής προστιθέμενης αξίας, καθώς συμβάλλουν στη δημιουργία ενός ενιαίου ψηφιακού περιβάλλοντος συνεργασίας. Παράλληλα, η έκταση της πραγματικής τους αποτελεσματικότητας διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του έργου, το τεχνολογικό υπόβαθρο των οργανισμών, το επίπεδο εκπαίδευσης των χρηστών και τις συνθήκες εφαρμογής. Το βασικό ερευνητικό πρόβλημα της εργασίας εστιάζει στην αποτίμηση της ουσιαστικής συμβολής των BIM προγραμμάτων στην παραγωγή καλύτερων κατασκευαστικών αποτελεσμάτων και στη διερεύνηση των παραγόντων που ενισχύουν την επιτυχή αξιοποίησή τους.

1.3 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της χρησιμότητας και της αποτελεσματικότητας των BIM προγραμμάτων στον κατασκευαστικό κλάδο μέσα από συνδυασμό βιβλιογραφικής ανασκόπησης και μελέτης περίπτωσης. Η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τον λειτουργικό ρόλο του BIM στη διαχείριση τεχνικών έργων, να παρουσιάσει τα βασικά πλεονεκτήματα που απορρέουν από την εφαρμογή του και να αποτυπώσει τις κυριότερες δυσκολίες που συνοδεύουν την ενσωμάτωσή του στην πράξη. Παράλληλα, επιδιώκεται η σύνδεση της θεωρητικής γνώσης με την πρακτική εμπειρία, ώστε να προκύψει μία ολοκληρωμένη εικόνα για την αξία των BIM εφαρμογών στον σύγχρονο κατασκευαστικό χώρο.

1.4 Ερευνητικοί στόχοι

Η εργασία αναπτύσσεται γύρω από συγκεκριμένους ερευνητικούς στόχους που οργανώνουν τη μελέτη και καθοδηγούν την ανάλυση. Πρώτος στόχος είναι η αποσαφήνιση της έννοιας του BIM και των βασικών χαρακτηριστικών του ως ψηφιακού εργαλείου διαχείρισης πληροφοριών. Δεύτερος στόχος είναι η παρουσίαση των κυριότερων BIM λογισμικών και των δυνατοτήτων που προσφέρουν στη μελέτη, στον συντονισμό και στην κατασκευή έργων. Τρίτος στόχος είναι η διερεύνηση των οφελών που συνδέονται με τη χρήση BIM σε επίπεδο επικοινωνίας, ποιότητας, χρόνου, κόστους και βιωσιμότητας. Τέταρτος στόχος είναι η ανάδειξη των τεχνολογικών, οικονομικών, οργανωτικών και εκπαιδευτικών παραγόντων που επηρεάζουν την εφαρμογή του. Τέλος, πέμπτος στόχος είναι η αποτύπωση της πρακτικής αξίας του BIM μέσα από μία μελέτη περίπτωσης τεχνικού έργου.

1.5 Ερευνητικά ερωτήματα

Με βάση τον σκοπό και τους στόχους της εργασίας, διαμορφώνονται τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα.

1. Ποια είναι η έννοια και τα βασικά χαρακτηριστικά του BIM στον κατασκευαστικό κλάδο;
2. Ποια λογισμικά BIM αξιοποιούνται συχνότερα και ποιες λειτουργίες προσφέρουν;
3. Σε ποιο βαθμό η εφαρμογή του BIM συμβάλλει στη βελτίωση του συντονισμού, στη μείωση σφαλμάτων, στη διαχείριση χρόνου και κόστους, στην ενίσχυση της ποιότητας και στη βιωσιμότητα των έργων;
4. Ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την αποτελεσματική υιοθέτηση των BIM προγραμμάτων από τους εμπλεκόμενους φορείς;
5. Πώς αποτυπώνεται στην πράξη η χρησιμότητα του BIM μέσα από την εξέταση ενός συγκεκριμένου τεχνικού έργου;

1.6 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η παρούσα εργασία ακολουθεί ποιοτική ερευνητική προσέγγιση και βασίζεται σε δύο συμπληρωματικούς άξονες. Ο πρώτος άξονας αφορά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση ελληνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τα προγράμματα BIM, τις εφαρμογές τους, τα πλεονεκτήματά τους και τις προκλήσεις που συνοδεύουν την υιοθέτησή τους. Η βιβλιογραφική διερεύνηση επιτρέπει τη θεωρητική θεμελίωση της μελέτης και την καταγραφή των βασικών τάσεων που εμφανίζονται στον επιστημονικό και επαγγελματικό διάλογο. Επιπρόσθετα, ο δεύτερος άξονας αφορά μία μελέτη περίπτωσης εφαρμογής BIM σε τεχνικό έργο (φράγμα Βαλσαμιώτη στα Χανιά), μέσα από την οποία αναδεικνύεται η θετική επίδρασή της εφαρμογής του BIM στη διαχείριση του έργου. Ο συνδυασμός των δύο αυτών προσεγγίσεων προσφέρει πληρότητα στην ανάλυση και ενισχύει τη δυνατότητα σύνθεσης θεωρίας και πράξης.

1.7 Δομή της εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε τέσσερα βασικά κεφάλαια, πέρα από τα εισαγωγικά και τα τελικά τμήματα. Το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζει το αντικείμενο,

τη σημασία του θέματος, το ερευνητικό πρόβλημα, τον σκοπό, τους στόχους, τα ερωτήματα και τη μεθοδολογική κατεύθυνση της μελέτης. Το δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσει το θεωρητικό πλαίσιο του BIM, παρουσιάζοντας την έννοια, την ιστορική του εξέλιξη, τις βασικές αρχές του και τα κυριότερα λογισμικά που χρησιμοποιούνται στον κλάδο. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στη χρησιμότητα και την αποτελεσματικότητα των BIM προγραμμάτων, μέσα από την ανάλυση των ωφελειών, των δυσκολιών εφαρμογής και των διεθνών εμπειρικών μελετών. Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μελέτη περίπτωσης εφαρμογής BIM σε τεχνικό έργο. Στη συνέχεια ακολουθεί η συζήτηση των ευρημάτων, όπου συνδέονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής και της εμπειρικής διερεύνησης, και ολοκληρώνεται η εργασία με τα συμπεράσματα και τις προτάσεις.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό πλαίσιο του BIM

2.1 Η έννοια του BIM

Το BIM, δηλαδή Building Information Modeling, αποδίδεται στα ελληνικά ως μοντελοποίηση κτιριακών πληροφοριών και αποτελεί βασική έννοια του ψηφιακού μετασχηματισμού στον κατασκευαστικό κλάδο. Στον πυρήνα του, το BIM αναφέρεται στη δημιουργία και διαχείριση ενός ψηφιακού μοντέλου, το οποίο συγκεντρώνει γεωμετρικά, τεχνικά, λειτουργικά και διαχειριστικά δεδομένα για ένα κτίριο ή μια τεχνική υποδομή. Η διεθνής βιβλιογραφία το προσεγγίζει ως ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός έργου, η οποία λειτουργεί ως κοινή βάση πληροφορίας για τους εμπλεκόμενους φορείς σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου (Eastman et al., 2018). Αντίστοιχα, το ISO 19650 συνδέει το BIM με τη συστηματική διαχείριση πληροφοριών σε όλη τη διάρκεια ζωής ενός δομημένου περιουσιακού στοιχείου, από τον σχεδιασμό και την κατασκευή έως τη λειτουργία και τη συντήρηση (International Organization for Standardization, 2018).

Αναλυτικότερα, η έννοια του BIM υπερβαίνει την απλή τρισδιάστατη απεικόνιση ενός κτιρίου, καθώς περιλαμβάνει τη σύνδεση του γεωμετρικού μοντέλου με πληροφορίες για υλικά, ποσότητες, κόστος, χρόνο, ενεργειακή συμπεριφορά, συντήρηση και τεχνική διαχείριση. Ο Succar (2009) αντιμετωπίζει το BIM ως ένα ευρύ γνωστικό και τεχνολογικό πεδίο της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής, της κατασκευής και της λειτουργίας των έργων, το οποίο απαιτεί σαφή οργάνωση των επιμέρους γνώσεων, διαδικασιών και εργαλείων. Με αυτή την έννοια, το BIM συνδυάζει τεχνολογία, συνεργασία και μεθοδολογία εργασίας, διαμορφώνοντας ένα κοινό περιβάλλον παραγωγής και ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ αρχιτεκτόνων, μηχανικών, εργολάβων, ιδιοκτητών και διαχειριστών εγκαταστάσεων.

Σημαντικό στοιχείο του BIM είναι η υποστήριξη της συνεργασίας και της λήψης αποφάσεων. Ο Azhar (2011) επισημαίνει ότι το BIM δίνει τη δυνατότητα στους επαγγελματίες του κλάδου να οπτικοποιούν το έργο σε προσομοιωμένο περιβάλλον και να εντοπίζουν τεχνικά, κατασκευαστικά και λειτουργικά ζητήματα ήδη από τα πρώτα στάδια. Παρόμοια, οι Bryde et al. (2013) δείχνουν ότι η χρήση του BIM συνδέεται με οφέλη στη διαχείριση έργων, καθώς ενισχύει τον συντονισμό, την

ακρίβεια των πληροφοριών και τον έλεγχο κρίσιμων παραμέτρων του έργου. Επομένως, το BIM λειτουργεί ως οργανωτικό πλαίσιο που βελτιώνει την επικοινωνία και την τεκμηρίωση μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η αξιοποίηση του BIM σε υφιστάμενα κτίρια. Οι Volk et al. (2014), μέσα από εκτενή ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, αναδεικνύουν τη χρησιμότητα του BIM για την αποτύπωση, ανακαίνιση, συντήρηση και διαχείριση υφιστάμενων κτιρίων. Η διάσταση αυτή δείχνει ότι το BIM αφορά τόσο τη φάση παραγωγής ενός νέου έργου όσο και τη μακροχρόνια παρακολούθηση της λειτουργίας του. Παράλληλα, η λογική του openBIM, την οποία προωθεί η buildingSMART International, στηρίζεται σε ανοικτά πρότυπα και ενισχύει τη διαλειτουργικότητα, δηλαδή την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών λογισμικών και οργανισμών.

Συνολικά, το BIM μπορεί να οριστεί ως μια ολοκληρωμένη ψηφιακή μεθοδολογία μοντελοποίησης και διαχείρισης πληροφοριών, η οποία υποστηρίζει τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση των τεχνικών έργων. Η αξία του βρίσκεται στη δυνατότητα συγκέντρωσης αξιόπιστων δεδομένων σε ένα κοινό ψηφιακό περιβάλλον, με στόχο την καλύτερη συνεργασία, τη μείωση σφαλμάτων, τον ακριβέστερο έλεγχο κόστους και χρόνου και τη βελτίωση της ποιότητας του κατασκευαστικού αποτελέσματος.

2.2 Ιστορική εξέλιξη του BIM

Το BIM μπορεί να οριστεί ως η ψηφιακή αποτύπωση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου (National Institute of Building Sciences, n.d.). Η αποτύπωση αυτή οργανώνεται σε ένα ενιαίο μοντέλο, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί, να διαχειριστεί και να αξιοποιηθεί συνεργατικά από όλους τους εμπλεκόμενους στον κατασκευαστικό κλάδο. Στην πράξη, η χρήση του πραγματοποιείται μέσω εξειδικευμένων λογισμικών υποβοηθούμενου σχεδιασμού, τα οποία καλύπτουν τον σχεδιασμό, τη διαχείριση της κατασκευής, την αποτίμηση, τη λειτουργία, τη συντήρηση και άλλες δραστηριότητες που συνδέονται με το κτίριο. Η ενσωμάτωση των φυσικών και λειτουργικών γνωρισμάτων ενός κτιρίου σε ένα διαχειρίσιμο ψηφιακό μοντέλο προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Ένα από τα σημαντικότερα αφορά την ακρίβεια του σχεδιασμού, καθώς το μοντέλο συμβάλλει

στον περιορισμό δυσλειτουργιών και κατασκευαστικών αδυναμιών που θα απαιτούσαν παρεμβάσεις με επιβάρυνση στην ποιότητα, στο κόστος και στον χρόνο υλοποίησης.

Η ιδέα της υπολογιστικής μοντελοποίησης των κατασκευών άρχισε να διαμορφώνεται στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ενώ στα μέσα της δεκαετίας του 1980 δημοσιεύθηκαν άρθρα που παρουσίαζαν πρακτικές δυνατότητες και σχετικά παραδείγματα (Ruffle, 1986; Aish, 1986). Ο όρος Building Information Models εμφανίστηκε για πρώτη φορά σε εργασία που δημοσιεύθηκε το 1992 (Van Nederveen & Tolman, 1992), ενώ η ευρύτερη διάδοσή του συνδέθηκε με το 2002, μέσα από λευκή βίβλο που δημοσιεύθηκε από την Autodesk (2002). Η καθιέρωση της συντομογραφίας BIM αποδίδεται στον Jerry Laiserin (2002).

Το πρώτο βιβλίο τεχνικού σχεδίου εκδόθηκε στη Γαλλία προς τα τέλη του 18ου αιώνα και άνοιξε τον δρόμο για την ανάπτυξη των τεχνικών γραφικών. Το τεχνικό σχέδιο εξελίχθηκε σε έναν από τους βασικούς πυλώνες του μηχανικού σχεδιασμού. Από τη μία πλευρά, επέτρεπε την απεικόνιση των κατασκευών σε επιμέρους τμήματα και, από την άλλη, παρείχε λεπτομερέστερη περιγραφή του προϊόντος, προσδιορίζοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια τα σχετικά δεδομένα (Monge, 1978). Ο υποβοηθούμενος από υπολογιστή σχεδιασμός στηρίχθηκε αρχικά και αυτός στη γραφική αναπαράσταση. Τα υπολογιστικά γραφικά προσέφεραν περισσότερες δυνατότητες από το σχέδιο στο χέρι, κυρίως ως προς την παρακολούθηση των αλλαγών στον σχεδιασμό και την αποθήκευση των δεδομένων. Παρότι στα σχέδια στο χέρι ήταν εύκολη η προσθήκη σκίτσων, σχολίων και προτάσεων, η ερμηνεία τους απαιτούσε πιο σύνθετη και χρονοβόρα εργασία. Σε τεχνικές εταιρείες όπου οι δραστηριότητες περιλάμβαναν σχεδιασμό, παραγωγή ή συντήρηση, τα σχέδια στο χέρι περιόριζαν την παραγωγικότητα. Αντίστοιχο ζήτημα υπήρχε και στις αλυσίδες τεχνικής παραγωγής, όπου πολλές εταιρείες συμμετείχαν στον σχεδιασμό, στην υλοποίηση και στη συντήρηση ενός προϊόντος. Όταν χρησιμοποιούνταν διαφορετικά εργαλεία CAD και CAM, οι μετατροπές δεδομένων δυσχέραιναν την αποτελεσματική συνεργασία. Έτσι, προέκυψε η ανάγκη ανάπτυξης μιας ουδέτερης ενδιάμεσης μορφής, η οποία θα διευκόλυνε την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών υπολογιστικών συστημάτων.

Η AICMA ιδρύθηκε στο Παρίσι το 1950 και το 1973 μετονομάστηκε σε AECMA (Association européenne des constructeurs de matériel aérospatial). Το 1977, η ένωση αυτή πρότεινε μια μορφή ανταλλαγής δεδομένων, ώστε οι συνεργαζόμενες εταιρείες να μπορούν να επικοινωνούν γεωμετρικές επιφανειών. Παρότι η μορφή αυτή εφαρμόστηκε σε ορισμένες περιπτώσεις, με την πάροδο του χρόνου περιορίστηκε η χρήση της (Goldstein, Kemmerer & Parks, 1998).

Στη δεκαετία του 1970, η επιτροπή ANSI (American National Standards Institute) X3 SPARC άρχισε να εξετάζει τρόπους περιγραφής των δεδομένων ανεξάρτητα από την εκάστοτε εφαρμογή ή την υπολογιστική τεχνολογία. Η επιτροπή πρότεινε μια μεθοδολογία τριών σχημάτων, σύμφωνα με την οποία διαφορετικές όψεις της ίδιας πληροφορίας, δηλαδή η εννοιολογική, η εσωτερική και η εξωτερική, μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μέσα από ποικίλα φίλτρα από χρήστες διαφορετικών υπολογιστικών τεχνολογιών (Goldstein, Kemmerer & Parks, 1998).

Με βάση τη μεθοδολογία ANSI X3 SPARC, η Πολεμική Αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών ανέπτυξε μια διαδικασία μοντελοποίησης πληροφοριών στο πλαίσιο του προγράμματος Integrated Computer Aided Manufacturing (ICAM). Στόχος του ICAM ήταν η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αυτοματοποίησης της παραγωγής, ικανών να μειώσουν το συνολικό κόστος προμηθειών. Το ICAM και τα επόμενα έργα, όπως τα Product Definition Data Interface (PDDI) και Geometric Modeling Application (GMAP), συνέβαλαν ουσιαστικά στην ανάπτυξη εργαλείων και διαδικασιών που ενσωματώθηκαν σε μεταγενέστερα πρότυπα (Goldstein, Kemmerer & Parks, 1998).

Ο οργανισμός CAM-I (Computer Aided Manufacturing International Inc.) συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη δομών δεδομένων B REP (Boundary Representation, αναπαράσταση ορίων) μέσω ενός έργου γεωμετρικής μοντελοποίησης που ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Το αποτέλεσμα της εργασίας που χρηματοδοτήθηκε από το CAM-I ήταν ουσιαστικά μια μαθηματική αναπαράσταση τυποποιημένης γεωμετρίας και τοπολογίας. Το έργο αυτό υπήρξε ιδιαίτερα προωθημένο για την εποχή του, επειδή περιείχε περισσότερες πληροφορίες από όσες μπορούσαν να ερμηνεύσουν τα τότε συστήματα CAD. Η προδιαγραφή CAM-I εστίαζε στην ουσιαστική περιγραφή ανταλλάξιμων δεδομένων, αφήνοντας σε δεύτερο επίπεδο τον μηχανισμό ανταλλαγής. Η περιγραφή αυτή υποβλήθηκε στην

επιτροπή ANSI Y 14.26 (Computer Aided Preparation of Product Definition Data). Το 1980, το NBS (National Bureau of Standards) δημοσίευσε το πρότυπο NBSIR 80 1978 για την ψηφιακή αναπαράσταση προδιαγραφών δεδομένων προϊόντος στις επικοινωνίες. Το πρότυπο αυτό εγκρίθηκε ως η πρώτη έκδοση του ANSI IGES (Initial Graphics Exchange Specification), δηλαδή ως ουδέτερη μορφή μπλοκ δεδομένων που ρύθμιζε την ψηφιακή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων CAD (Goldstein, Kemmerer & Parks, 1998).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, στις Ηνωμένες Πολιτείες συγκροτήθηκε μια ομάδα υπό τον κοινό συντονισμό της βιομηχανίας, της κυβέρνησης και των πανεπιστημίων. Σκοπός της ήταν η ανάπτυξη προτύπων και τεχνολογιών που θα επέτρεπαν τον έλεγχο και την ανταλλαγή δεδομένων προϊόντος μεταξύ διαφορετικών υπολογιστικών συστημάτων. Η ομάδα αυτή επικεντρώθηκε σε δύο βασικά έργα, από τα οποία προέκυψαν το IGES και το PDES (Product Data Exchange Specification) (Mies, 2002).

Αντίστοιχα, στη Γερμανία, το 1982, η Ένωση Κατασκευαστών Αυτοκινήτων ανέπτυξε τη μορφή VDA FS (Verband der Automobilindustrie Flachenschnittstelle) για καμπύλες και επιφάνειες οποιασδήποτε μορφής, με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας και της εφαρμοσιμότητας των συστημάτων CAD και CAM στις διαδικασίες σχεδιασμού. Με αυτόν τον τρόπο, η Γερμανία συνέβαλε και αυτή στην τυποποίηση των διεθνών μοντέλων δεδομένων προϊόντος (Goldstein, Kemmerer & Parks, 1998).

Επίσης το 1982, στη Φινλανδία άρχισαν να διαμορφώνονται ιδέες για την ανάπτυξη εργαλείων κατασκευής με υποβοήθηση υπολογιστή. Έτσι, το 1983, το RACAD, φινλανδική συντομογραφία του Computer Aided Design Construction Council, και το VTT, φινλανδική συντομογραφία του Technical Research Center, δημοσίευσαν μελέτη για τον ολοκληρωμένο υποβοηθούμενο από υπολογιστή σχεδιασμό. Ως αποτέλεσμα των παράλληλων δραστηριοτήτων αυτών των δύο οργανισμών, πραγματοποιήθηκε το έργο RATAS, φινλανδική συντομογραφία του Computer Assisted Design of Buildings, κατά την περίοδο 1985 έως 1991. Οι προτάσεις του σχετίζονταν με τις δομές μορφών μεταφοράς δεδομένων, σύμφωνα με τις οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιούνται οποιεσδήποτε δομές δεδομένων μέσα στις εφαρμογές, υπό την προϋπόθεση ότι υπήρχαν κατάλληλα προγράμματα

φιλτραρίσματος για την ψηφιακή ανταλλαγή δεδομένων. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν μια γλώσσα περιγραφής γνώσης βασισμένη σε κανόνες και ένα γενικό πλαίσιο μοντέλου δεδομένων. Η πρόταση για ένα πρότυπο μεταφοράς δεδομένων προϊόντος προέβλεπε τη διαχείριση των αντικειμένων ένα προς ένα και εισηγούνταν τη χρήση γλώσσας προγραμματισμού με σύνταξη παρόμοια με τη LISP (Bjork, 2009).

Το γαλλικό έργο SET (Standard d'Echange et de Transfer) ξεκίνησε το 1983 στο πλαίσιο της Aérospatial. Αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει προβλήματα εφαρμογής του IGES, κυρίως στους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροδιαστημικής παραγωγής. Το SET αντανάκλυνε τις απαιτήσεις ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων CAD και CAM, καθώς και τις ανάγκες για ψηφιακή αποθήκευση δεδομένων.

Μέχρι το 1984, όλες αυτές οι διεθνείς προσπάθειες είχαν οδηγήσει σε τόσο συγκρίσιμα αποτελέσματα, ώστε άρχισε να διαφαίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης μιας κοινής λύσης για την ανταλλαγή δεδομένων CAD. Οι βασικοί παράγοντες που ώθησαν προς αυτό το διεθνές πρότυπο ήταν το παγκόσμιο εμπόριο και η ανταλλαγή δεδομένων, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των προϊόντων, το λογισμικό πολλαπλών χρήσεων, όπως συστήματα σχεδιασμού ή μηχανικής που μπορούσαν να αξιοποιηθούν σε πολλούς κλάδους και δραστηριότητες, η ανάγκη εμπιστοσύνης προς τους προμηθευτές σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του προϊόντος και η υποστήριξη ολόκληρου του κύκλου ζωής του προϊόντος (Goldstein, Kemmerer & Parks, 1998).

Πολλοί θεωρούσαν ότι το IGES κάλυπτε με περιορισμένο τρόπο αυτές τις ανάγκες. Ως αποτέλεσμα των διεθνών εξελίξεων, η πρώτη προδιαγραφή Product Data Exchange Specification (PDES) κυκλοφόρησε στις Ηνωμένες Πολιτείες τον Ιούλιο του 1984 και ακολούθησε δεύτερη έκδοση τον Νοέμβριο. Οι εκδόσεις αυτές ενσωματώθηκαν αργότερα στην προδιαγραφή STEP (STandard for the Exchange of Product model data), η οποία αναπτύχθηκε από την επιτροπή ISO TC184 SC4, ξεκίνησε το 1988 και καταχωρίστηκε ως ISO 10303 (Mies, 2002).

Το BPM (Building Product Model) παρουσιάστηκε το 1989, με στόχο να καλύψει τον σχεδιασμό, την εκτίμηση κόστους και την κατασκευή, περιλαμβάνοντας όλες τις φάσεις των διαδικασιών κατασκευής κτιρίων. Παρότι η συγκεκριμένη προδιαγραφή επικεντρωνόταν περισσότερο στη μοντελοποίηση προϊόντος, ενσωμάτωνε ακόμη σε περιορισμένο βαθμό όλες τις πληροφορίες που απαιτούνταν

για τον σχεδιασμό και τη διαχείριση της κατασκευής. Μια πιο προωθημένη προσέγγιση αποτέλεσε το CIC (Computer Integrated Construction) (Penttilä, 1989).

Ως συνέπεια της εξέλιξης των προτύπων δεδομένων προϊόντος και της ανάπτυξης της αγοράς τεχνικού λογισμικού, το 1994 σχηματίστηκε, ύστερα από πρόταση της Autodesk, μια βιομηχανική κοινοπραξία 12 εταιρειών με την ονομασία Industry Alliance for Interoperability (IAI). Σκοπός της ήταν η ανάπτυξη κλάσεων C++ που θα υποστήριζαν την ολοκληρωμένη ανάπτυξη λογισμικού. Ως αποτέλεσμα, το 1995 δημοσιεύθηκε ένα πλαίσιο μοντέλου δεδομένων για αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά προϊόντα και υπηρεσίες, με την ονομασία IFC (Industry Foundation Classes). Η κοινοπραξία μετονομάστηκε το 1997 σε International Alliance for Interoperability και αργότερα, το 2005, σε buildingSMART (buildingSMART International, n.d.).

Επίσης το 1995, εισήχθη η έννοια του GBM (Generic Building Model), η οποία δημιούργησε τη δυνατότητα ολοκληρωμένης και συνεργατικής αξιοποίησης της πληροφορίας από την αρχή του σχεδιασμού έως το τέλος της ζωής του κτιρίου. Η εξέλιξη αυτή έδωσε την κύρια ώθηση για την εμφάνιση του BIM μετά την αλλαγή της χιλιετίας. Η πρώτη γλώσσα σήμανσης, γνωστή ως SGML (Standard Generalized Markup Language), εισήχθη το 1986 με σκοπό την περιγραφή δεδομένων ως κειμένου. Με την εξάπλωση του Παγκόσμιου Ιστού, η HTML (HyperText Markup Language) εξελίχθηκε στο πιο διαδεδομένο εργαλείο διάδοσης πληροφοριών. Καθώς οι χρήστες άρχισαν να ζητούν όχι μόνο επικοινωνία δεδομένων αλλά και ανταλλαγή δεδομένων, το W3C (World Wide Web Consortium) δημοσίευσε το 1998 μια πιο εξελιγμένη γλώσσα σήμανσης, την XML (eXtensible Markup Language). Η διάδοση και χρήση αυτής της νέας γλώσσας οδήγησε σε αρκετές εφαρμογές και στον κατασκευαστικό τομέα, όπως η aecXML (Architecture, Engineering and Construction XML), η οποία ξεκίνησε από την Bentley Systems και στη συνέχεια αναπτύχθηκε από την IAI για τις ανάγκες της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Το έργο eConstruct (IST 1999 10303) ξεκίνησε στην Ευρώπη στα τέλη της δεκαετίας του 1990. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε η bcXML (Building and Construction XML), η οποία εξελίχθηκε σε σύστημα βασισμένο σε ταξινόμια και λεξιλόγιο (van Rees, 2006).

Η bcXML αποτέλεσε τη βάση για τη γλώσσα σήμανσης ceXML (Civil Engineering XML), την οποία ανέπτυξε ο Reinout van Rees στο πλαίσιο της

μεταπτυχιακής του διατριβής (van Rees, 2000). Καθώς η βασική ταξινόμια του eConstruct κρίθηκε περιορισμένη, η ιδέα αναπτύχθηκε περαιτέρω το 2000 στο πλαίσιο ενός άλλου έργου, του IST 2000 28671 με την ονομασία E COGNOS, όπου η ταξινόμια αντικαταστάθηκε από οντολογία (European Commission, n.d.).

Η επεξεργασία δεδομένων που βασίζεται σε γλώσσες σήμανσης επέτρεψε ανοικτή, επεκτάσιμη και ασφαλή ανάπτυξη, καθώς απαιτούσε ελάχιστη εξάρτηση από ειδικό λογισμικό. Σύμφωνα με ορισμένες απόψεις, η βασική ιδέα του BIM μπορεί να αποδοθεί στον Douglas C. Engelbart, ο οποίος ήδη το 1962 αναφέρθηκε στη συνδυασμένη αρχιτεκτονική χρήση του αντικειμενοστραφούς σχεδιασμού, της παραμετρικής διαχείρισης και της σχεσιακής βάσης δεδομένων. Την ίδια χρονιά παρουσιάστηκε το Sketchpad, ενώ το 1964 ακολούθησε το DAC 1, ανοίγοντας τον δρόμο για τον υποβοηθούμενο από υπολογιστή σχεδιασμό (Engelbart, 1962).

Ωστόσο, η πλειονότητα των μελετητών θεωρεί τον Charles Eastman ως τον πατέρα του BIM, επειδή το 1975 παρουσίασε μια πρωτοποριακή εφαρμογή λογισμικού που ανέπτυξε με την ονομασία BDS (Building Description System) (Eastman, 1975). Το σύστημα αυτό περιλάμβανε χιλιάδες αρχιτεκτονικά στοιχεία, τα οποία μπορούσαν να συνδυαστούν γραφικά για τη δημιουργία διαφορετικών σχεδίων κτιρίων. Κατά τον Eastman, τα αρχιτεκτονικά σχέδια παρουσίαζαν περιορισμένη αποδοτικότητα, καθώς διαφορετικά τμήματα και διαστάσεις επαναλαμβάνονταν σε πολλά σημεία. Θεωρούσε ότι η χρήση του BDS θα μπορούσε να μειώσει το κόστος σχεδιασμού και να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα. Η διάδοση του BDS παρέμεινε περιορισμένη, επειδή η βιβλιοθήκη αρχιτεκτονικών και δομικών στοιχείων του είχε μικρό εύρος. Το 1977 ο Eastman παρουσίασε ένα νέο λογισμικό, το GLIDE (Graphical Language for Interactive Design), το οποίο αποτέλεσε βελτιωμένη εκδοχή της πρώτης του εφαρμογής και επέτρεπε ακριβέστερη επεξεργασία, καλύτερο έλεγχο του σχεδιασμού και δυνατότητα εκτίμησης κόστους (Eastman & Henrion, 1977).

Στην Έκθεση του Ανόβερου το 1980, το αρχιτεκτονικό και τεχνικό γραφείο που είχε ιδρύσει ο Georg Nemetschek το 1963 παρουσίασε ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα σχεδιασμού και υπολογισμών για στατικό σχεδιασμό. Με αυτόν τον τρόπο άνοιξε ο δρόμος για την ανάπτυξη υποβοηθούμενης από υπολογιστή μηχανικής σε μικροϋπολογιστές. Το πρόγραμμα έγινε γνωστό ως AllPlan το 1984. Από τη δεκαετία του 1990 η εταιρεία αναπτύχθηκε εντυπωσιακά και το 1997 παρουσίασε το

πακέτο O.P.E.N., το οποίο βασιζόταν σε βάση δεδομένων και θεωρείται πρόδρομος του σημερινού OpenBIM. Στα επόμενα χρόνια, μέσα από διαδοχικές εξαγορές και συγχωνεύσεις, η εταιρεία εξελίχθηκε σε έναν από τους μεγαλύτερους ομίλους του χώρου (Nemetschek Group, n.d.).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η Bentley Systems ξεκίνησε την ανάπτυξη του MicroStation, εισάγοντας τη μορφή DGN (DesiGN). Η συγκεκριμένη σουίτα διατέθηκε αργότερα από την Intergraph ως MicroStation Triforma. Αρχικά σχεδιάστηκε ως επεξεργαστής δεδομένων IDGN (Interactive Graphics Design System) για προσωπικούς υπολογιστές. Μέχρι το 1992 απέκτησε δική της γλώσσα προγραμματισμού, την MDL (MicroStation Development Language), η οποία στο τέλος της δεκαετίας επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει και Java (Sumbera, 2001). Η διαδικασία που ενσωματώθηκε στο πακέτο λογισμικού ονομάστηκε από την Bentley Systems ολοκληρωμένη μοντελοποίηση έργου (Howell & Batcheler, 2011). Η εταιρεία υπήρξε επίσης ένα από τα ιδρυτικά μέλη της ODA (Open Design Alliance) το 1998. Βασικός σκοπός της ODA ήταν η δημιουργία εργαλείων ανάπτυξης τεχνικού λογισμικού και φίλτρων που θα διευκόλυναν την ελεύθερη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών και πλατφορμών. Αρχικά ονομαζόταν OpenDWG Alliance και το 2002 έλαβε τη σημερινή της ονομασία. (Open Design Alliance, n.d.).

Το πιο γνωστό λογισμικό του χώρου είναι πιθανότατα το AutoCAD. Η πρώτη του έκδοση γράφτηκε για το λειτουργικό σύστημα CP M και κυκλοφόρησε το 1982, εισάγοντας τη μορφή DXF (Drawing Exchange File). Μέσα σε έναν χρόνο είχε σχεδόν 1000 χρήστες (Weisberg, 2008). Το λογισμικό της Autodesk αναπτύχθηκε με βάση ένα προηγούμενο πρόγραμμα του Michael Riddle, συνιδρυτή της Autodesk και αργότερα δημιουργού των EasyCAD και FastCAD. Το πρόγραμμα εκείνο είχε δημιουργηθεί το 1979 με την ονομασία Interact (Riddle, n.d.) και εισήγαγε την πρώτη έκδοση της μορφής DWG. Το AutoCAD Release 2.1 παρουσιάστηκε το 1986 και περιλάμβανε ως καινοτομία την ενσωματωμένη γλώσσα AutoLISP, η οποία βασίστηκε στη γλώσσα προγραμματισμού XLISP. Μέχρι τη δεκαετία του 1990, η Autodesk είχε εξελιχθεί σε σημαντικό δημιουργό λογισμικού CAD και το AutoCAD είχε καταστεί ένα από τα πιο αναγνωρίσιμα προγράμματα. Η Autodesk άρχισε αργότερα να αναπτύσσει εξειδικευμένα πακέτα για αρχιτέκτονες και πολιτικούς μηχανικούς, κυρίως μετά από εξαγορές εταιρειών, όπως οι Micro Engineering Solution, Softdesk, Discreet Logic και Revit Technology Corporation, καθώς και μετά

από αγορές τεχνολογιών λογισμικού που οδήγησαν και σε πακέτα ανεξάρτητα από το AutoCAD, όπως τα Revit, RoboBat και Graitec.

Οι Gábor Bojár και István Gábor Tari ίδρυσαν την εταιρεία λογισμικού Graphisoft στη Βουδαπέστη το 1982 (Graphisoft, 2004). Το βασικό της προϊόν κυκλοφόρησε το 1984 με την ονομασία Radar CH και στη συνέχεια αναπτύχθηκε με επιτυχία ως ArchiCAD. Το λογισμικό αυτό βασίζεται σε αντίληψη παρόμοια με εκείνη του BDS και θεωρείται η πρώτη εφαρμογή BIM που λειτούργησε σε προσωπικούς υπολογιστές. Η Graphisoft περιέγραφε αυτόν τον βιβλιοθηκοκεντρικό παραμετρικό τρόπο επεξεργασίας ως εικονικό κτίριο (Howell & Batcheler, 2011). Με τη βοήθεια της ενσωματωμένης γλώσσας GDL (Geometric Description Language), προσέφερε και τη δυνατότητα επέκτασης της βιβλιοθήκης αρχιτεκτονικών στοιχείων. Η εταιρεία εντάχθηκε στην IAI το 1996 και τα επόμενα χρόνια παρουσίασε τα ArchiCAD for TeamWork και ArchiFM (Graphisoft, 2004). Το 2002, το ArchiCAD έλαβε την πιστοποίηση IFC 2x. Η επιτυχία και η δημοφιλία του ArchiCAD επιβεβαιώθηκαν και από την εξαγορά του κλάδου ανάπτυξης λογισμικού της Graphisoft από τον όμιλο Nemetschek το 2006.

Αντίστοιχα, η Data Design System AS ιδρύθηκε το 1984 στη Νορβηγία και το λογισμικό της, DDS CAD, απευθυνόταν κυρίως στον τομέα του κτιριακού εξοπλισμού. Ως αποτέλεσμα της ανάπτυξής της, η εταιρεία εντάχθηκε στον όμιλο Nemetschek το 2013. Μετά από αυτή την εξέλιξη κυκλοφόρησαν και εκδόσεις λογισμικού για αρχιτέκτονες και πολιτικούς μηχανικούς (Data Design System, n.d.).

Η PTC (Parametric Technology Corporation) ιδρύθηκε το 1985 στη Βοστώνη και το 1988 παρουσίασε την πρώτη έκδοση του λογισμικού Pro ENGINEER για τη μηχανολογία. Η PTC απέκτησε και συνέχισε να αναπτύσσει το πακέτο Reflex, το οποίο προσφέρθηκε για αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, με περιορισμένη απήχηση. Το 1997, οι Irwin Jungreis και Leonid Raiz αποχώρησαν από την εταιρεία, με σκοπό να ξεκινήσουν την ανάπτυξη παραμετρικού λογισμικού κατάλληλου για τη δημιουργία πιο σύνθετων μοντέλων. Η επιτυχία τους έγινε ορατή το 2000, όταν κυκλοφόρησε η πρώτη έκδοση του Revit, με τη διαδικασία του να περιγράφεται ως παραμετρική μοντελοποίηση κτιρίου. Η ανάπτυξη του πακέτου προχώρησε γρήγορα τα επόμενα δύο χρόνια, μέχρι την εξαγορά του από την Autodesk το 2002. Την ίδια χρονιά, η Autodesk δημοσίευσε τη λευκή βίβλο της για το BIM (Autodesk Inc., 2002).

Η Robot Diffusion, αργότερα γνωστή ως RoboBAT, άρχισε στη Γαλλία τη διάθεση του λογισμικού ROBOT CONCEPTION στην Τουλούζη το 1985. Το πρόγραμμα γνώρισε σημαντική επιτυχία ως ROBOT Structures το 1988. Το 1999 η RoboBAT έγινε επίσημος συνεργάτης της Autodesk και έναν χρόνο αργότερα το λογισμικό της αναπτύχθηκε περαιτέρω με βάση το AutoCAD, με την ονομασία ROBOT Millennium. Η εταιρεία ανέπτυξε επίσης και άλλα πακέτα, όπως CAO, RCAD και CBS Pro, μέσα από διάφορες συνεργασίες μετά το 2000, ενώ το 2014 συγχωνεύθηκε με τον όμιλο GRAITEC (BIMware, n.d.).

Η ανάπτυξη του TurboCAD για υπολογιστές IBM ξεκίνησε στη Νότια Αφρική στο πρώτο μισό της δεκαετίας του 1980. Το λογισμικό άρχισε να διατίθεται στο Ηνωμένο Βασίλειο και στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1986. Από το 1990 η διανομή του πραγματοποιήθηκε από την IMSI (International Microcomputer Software). Όπως και το Generic CADD, που εμφανίστηκε σχεδόν την ίδια περίοδο, έγινε γνωστό ως μια οικονομικότερη εναλλακτική λύση έναντι του AutoCAD.

Παρότι η SCIA (Scientific Applications) ιδρύθηκε στο Βέλγιο το 1974, το πρώτο της λογισμικό παρουσιάστηκε το 1987 και αφορούσε τη μοντελοποίηση συνδέσεων σε χαλύβδινες κατασκευές. Το SteelFab, το οποίο προοριζόταν για τη μοντελοποίηση χαλύβδινων πλαισίων, κυκλοφόρησε το 1990. Ξεκίνησε ως πακέτο CAD βασισμένο στο UNICAD και αργότερα αναβαθμίστηκε και αναπτύχθηκε περαιτέρω με βάση το AutoCAD. Από το 2006, η Nemetschek απέκτησε την εταιρεία και το πιο δημοφιλές προϊόν της, το SCIA Engineer, έγινε το πρώτο λογισμικό στατικής ανάλυσης που έλαβε την πιστοποίηση IFC 2x3 το 2013 (SCIA, n.d.).

Η GRAITEC ιδρύθηκε το 1986 από τον Francis Guillemard. Τρία χρόνια αργότερα παρουσίασε το λογισμικό Effel για μοντελοποίηση και ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, χάλυβα και ξύλο. Το 1992 εισήγαγε το Arche, ένα πρόγραμμα για προσομοίωση κτιρίων και αυτοματοποιημένο σχεδιασμό οπλισμού σκυροδέματος. Δύο χρόνια αργότερα παρουσίασε το Melody, ένα πρόγραμμα για τον αυτόματο σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση συνδέσεων σε δισδιάστατα χαλύβδινα πλαίσια. Το 1997 άρχισε να συνεργάζεται με την Autodesk ως επίσημος συνεργάτης ανάπτυξης και το 1999 ίδρυσε θυγατρική στη Ρουμανία. Από το 2001, η εταιρεία διαθέτει νέα προϊόντα,

όπως τα Advance Concrete και Advance Steel, ως συνεργάτης της Autodesk (GRAITEC, n.d.).

Στη Ρουμανία, το λογισμικό Polied αναπτύχθηκε από το C.T.C.E. Cluj (Cluj Territorial Electronic Computing Center) για τρισδιάστατη συρματοπλαισιακή μοντελοποίηση σωμάτων σε μοντέλα CAD. Η ανάπτυξή του ολοκληρώθηκε το 1984. Το 1986 ο συγγραφέας παρακολούθησε δοκιμαστική επίδειξη, όπου το πρόγραμμα αποδείχθηκε ταχύτερο από το AutoCAD Release 2.1 της εποχής, αν και οι εμπορικές του δυνατότητες παρέμειναν πολύ περιορισμένες (C.T.C.E. Cluj, n.d.).

Η ελβετική Cadwork Informatik AG ιδρύθηκε το 1988, συνεχίζοντας την ανάπτυξη λογισμικού που είχε ξεκινήσει το 1980 από το CSEM (Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique) και το EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) (Froidevaux, 2003). Αρχικά το λογισμικό είχε σχεδιαστεί για τον σχεδιασμό ρολογιών, αλλά στη συνέχεια εξελίχθηκε σε ένα από τα πιο γνωστά προγράμματα υποβοηθούμενου σχεδιασμού και κατασκευής ξύλινων κατασκευών. Λογισμικά βασισμένα στο BIM, όπως το Cadwork Ingénieur, ένα συστατικό για τον σχεδιασμό οδικών δικτύων, και το Lexocad, άρχισαν να αναπτύσσονται το 2004. Σήμερα, το πιο γνωστό προϊόν της εταιρείας παραμένει το Cadworks Wood (Breit et al., 2008).

Το Tekla X Steel, πρόδρομος του Tekla Structures, κυκλοφόρησε το 1993. Η φινλανδική εταιρεία Teknallinen Laskenta Oy (Technical Computing Ltd.) είχε ιδρυθεί το 1966 με σκοπό την παροχή ενός ενιαίου γραφείου προγραμματισμού υπολογιστών για διάφορες τεχνικές δραστηριότητες. Το 2011, η Trimble Navigation εξαγόρασε την Tekla. Στη συνέχεια κυκλοφόρησε το Tekla BIMsight, μια ανοικτή εφαρμογή λογισμικού βασισμένη σε μοντέλα κτιριακών πληροφοριών, με στόχο τη συνεργατική εργασία σε κατασκευαστικά έργα. Η εφαρμογή αυτή επέτρεπε την εισαγωγή μοντέλων από άλλες εφαρμογές BIM μέσω της μορφής IFC (Trimble, n.d.).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 ιδρύθηκε στην Καλιφόρνια η εταιρεία ανάπτυξης λογισμικού IntelliCADD. Ένα από τα προϊόντα της ήταν το AutoCAD Data Extension, το οποίο επέτρεπε σε πολλούς χρήστες να έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση στο ίδιο σχέδιο AutoCAD. Το 1994, η Softdesk απέκτησε το λογισμικό και επιχείρησε να το αναπτύξει ως κλώνο του AutoCAD. Η Autodesk κινήθηκε αρχικά νομικά εναντίον της Softdesk, αλλά τελικά την εξαγόρασε το 1996, ενώ ορισμένοι

από τους αρχικούς εργαζομένους της μετακινήθηκαν στη Visio (Newton, 1997). Το Visio IntelliCAD παρουσιάστηκε το 1998 σε πολύ χαμηλότερη τιμή από το AutoCAD. Η Visio δυσκολεύτηκε να υποστηρίξει μόνη της την περαιτέρω ανάπτυξη του προγράμματος και έτσι δημιουργήθηκε το ITC (IntelliCAD Technology Consortium), το οποίο ανέλαβε τα πλήρη δικαιώματα της έκδοσης του 2000. Το ITC υπήρξε επίσης ένα από τα ιδρυτικά μέλη της ODA και, με την πάροδο του χρόνου, το λογισμικό εξελίχθηκε σε γενική πλατφόρμα ανάπτυξης. Από αυτό ξεκίνησε και το βελγικής προέλευσης BricsCAD, καθώς και η σειρά FINE MEP (Mechanical Electrical and Plumbing) (IntelliCAD Technology Consortium, n.d.).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, η AutoDesSys (Automated Design Systems) παρουσίασε το πρώτο της λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης και κινούμενης απεικόνισης για προσωπικούς υπολογιστές, το οποίο κυκλοφόρησε το 1991 με την ονομασία Form Z. Το πρόγραμμα σημείωσε μεγάλη επιτυχία, όχι μόνο στην αρχιτεκτονική μοντελοποίηση, αλλά και στους κλάδους των ηλεκτρονικών παιχνιδιών και του κινηματογράφου (Serraino, 2002).

Το γραφείο του διεθνούς φήμης αρχιτέκτονα Frank Gehry άρχισε να συνεργάζεται με την Dassault Systemes το 2005. Ως αποτέλεσμα αυτής της συνεργασίας κυκλοφόρησε το πακέτο CAD Digital Project, βασισμένο στο CATIA (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application), καθώς και το λογισμικό GTeam για τον συντονισμό έργων. Το CATIA είναι ένα πολυπλατφορμικό πακέτο λογισμικού για υποβοηθούμενο από υπολογιστή σχεδιασμό CAD, υποβοηθούμενη από υπολογιστή παραγωγή CAM, υποβοηθούμενη από υπολογιστή μηχανική CAE, διαχείριση κύκλου ζωής προϊόντος PLM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση 3D. Η ανάπτυξή του είχε ξεκινήσει το 1977 (Bernard, 2010).

Ως αποτέλεσμα αυτών των πρωτοβουλιών, στον κατασκευαστικό κλάδο διατίθεται σήμερα μεγάλος αριθμός λογισμικών που βασίζονται στο BIM, καλύπτοντας και γειτονικά πεδία, όπως GIS και PIF. Παράλληλα με το BIM, σημαντική διάδοση έχει αποκτήσει και το OpenBIM, το οποίο κερδίζει έδαφος χάρη στους δημιουργούς λογισμικού που υποστηρίζουν την ανάπτυξη ανοικτής πρόσβασης του μοντέλου δεδομένων τύπου buildingSMART.

Συμπερασματικά, από τον 18ο αιώνα έως τα μέσα του 20ού αιώνα, το τεχνικό σχέδιο αποτέλεσε το κυρίαρχο εργαλείο σχεδιασμού, με περιορισμένες αλλαγές στη

διάρκεια δύο αιώνων. Η εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και στη συνέχεια η ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών δεδομένων προϊόντος PDTs (Product Data Technologies, τεχνολογίες δεδομένων προϊόντος) και της υπολογιστικής τεχνολογίας οδήγησαν στη σημερινή μοντελοποίηση κτιριακών πληροφοριών. Η εξέλιξη αυτή επιτρέπει ακριβέστερη δομική λεπτομέρεια και εκτίμηση κόστους, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει ουσιαστικά την ποιότητα της τεκμηρίωσης, τη συντήρηση και την παρακολούθηση των κτιρίων σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

2.3 Βασικές αρχές και χαρακτηριστικά του BIM

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι τα μοντέλα BIM είναι ψηφιακά αρχεία που περιέχουν σημασιολογικές πληροφορίες σχετικά με τα στοιχεία του κτιρίου, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων σε κατασκευαστικά έργα μέσω ανταλλαγής και συνεργασίας. Τα BIM είναι σε θέση να διατηρούν σημασιολογία σχετικά με ένα κτίριο σε ψηφιακή μορφή, συμπεριλαμβανομένων στοιχείων όπως η τοποθεσία, οι διαστάσεις και οι ιδιότητες των στοιχείων του κτιρίου. Άτομα που εργάζονται σε διάφορες τοποθεσίες, χρησιμοποιώντας διαφορετικά εργαλεία και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μπορούν να συνεργαστούν για να επιτύχουν ένα κοινό αποτέλεσμα. Επιτρέπει επίσης βελτιωμένη ανάλυση της κατάστασης μέσω προσομοίωσης και αποτελεί μια διαδικασία οπτικοποίησης των στοιχείων του κτιρίου στην αρχική διαδικασία σχεδιασμού. Όταν χρησιμοποιείται αποτελεσματικά, το BIM μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο, να μειώσει το κόστος και να βελτιστοποιήσει τη διαδικασία κατασκευής καθώς ενοποιεί όλες τις πληροφορίες των στοιχείων του κτιρίου σε μια ενιαία προσβάσιμη τοποθεσία, επιτρέποντας σε οποιονδήποτε εμπλέκεται στο έργο να τις χρησιμοποιήσει για διάφορους σκοπούς. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στο BIM υποστηρίζουν ποικίλες εφαρμογές, όπως η δημιουργία δομικών μοντέλων, η εκτίμηση ποσοτήτων, ο προγραμματισμός σε 4D, η διεξαγωγή ενεργειακών αναλύσεων και η προσομοίωση της απόδοσης του κτιρίου (Olofsson, Lee & Eastman, 2008).

Οι αλλαγές που γίνονται στο μοντέλο διαδίδονται αυτόματα σε όλο το έργο, μειώνοντας τα σφάλματα συντονισμού. Με άλλα λόγια, το BIM προσφέρει την ευκαιρία να επιτευχθούν οι μακροχρόνιοι στόχοι της βιομηχανίας για την

ελαχιστοποίηση των υπερβάσεων κόστους, την καλύτερη διαχείριση του χρόνου, την ενίσχυση της παραγωγικότητας και της ποιότητας και τη μείωση των καθυστερήσεων στο έργο. Ως εκ τούτου, μπορεί να αναφέρεται ως αποθετήριο κοινών πληροφοριών σχετικά με ένα κατασκευαστικό έργο για να βοηθήσει την ομάδα σχεδιασμού να λάβει αξιόπιστες αποφάσεις σε όλα τα στάδια του έργου (Rokooei, 2015).

Σκοπός του BIM είναι να φέρει όλους τους επαγγελματίες κατασκευαστικών έργων σε μια κοινή πλατφόρμα (Allen & Shakantu, 2006). Η διαχείριση δεδομένων ενσωματώνεται λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρη την έκταση της σύγχρονης πιθανής χρήσης του BIM, από τον αρχικό σχεδιασμό έως το τέλος του κύκλου ζωής ενός κτιρίου. Κατά τη διάρκεια της χρήσης, να βοηθά τους ιδιοκτήτες/διαχειριστές εγκαταστάσεων που είναι υπεύθυνοι για τη συντήρηση και τις λειτουργίες με μεγαλύτερη γνώση, προσφέροντας στους ιδιοκτήτες ένα μοντέλο όπως έχει κατασκευαστεί. Για μια ποικιλία λειτουργικών τομέων όπως η κατασκευή, έχουν δημιουργηθεί εργαλεία διαχείρισης κύκλου ζωής και σχεδιασμού σε πακέτα λογισμικού BIM, δεδομένων των πολυπλοκοτήτων που σχετίζονται με τις απαιτήσεις των ενδιαφερομένων και του έργου. Πολλές εταιρείες, αντί να επιχειρήσουν μια πλήρη ανάπτυξη BIM, προσδιορίζουν συγκεκριμένους τομείς στις συγκεκριμένες απαιτήσεις και τους στρατηγικούς τους στόχους. Επιθυμούν να επικεντρώσουν τις προσπάθειές τους. Το BIM παρέχει διαφορετικές φάσεις ακολουθιών δραστηριοτήτων και κατασκευαστικών εργασιών, διευκολύνοντας τη μελέτη και τον ακριβέστερο χρονοπρογραμματισμό του έργου. Ο συμφωνημένος χρόνος ολοκλήρωσης του έργου εξασφαλίζεται με αυτήν τη μέθοδο. Για την ολοκλήρωση του έργου, αυτό βοηθά τον εργολάβο να αναπτύξει το κατάλληλο οικονομικό σχέδιο, ώστε η ικανότητα του BIM να παρέχει αυτόματη εκτίμηση ποσοτήτων και κόστους να διασφαλίζει προβλέψιμο κόστος υλοποίησης του έργου σε όλο το στάδιο του σχεδιασμού (Charehzehi et al., 2017).

Οι επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου μπορούν να επωφεληθούν από το BIM τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο, κατανοώντας τις ιδέες που το υποστηρίζουν, επιτρέποντάς τους να έχουν συζητήσεις με πελάτες και συναδέλφους που είναι καλά ενημερωμένες, εξετάζοντας τις βασικές αρχές του BIM, τη σύγχρονη εφαρμογή του στην πράξη και πώς τα πράγματα μπορεί να αλλάξουν στο μέλλον. Το BIM χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή, τη δημιουργία και τη συλλογή κοινών δομημένων και έξυπνων πληροφοριών και δεδομένων σε ένα έργο.

Για να κατανοήσουμε τις αρχές πίσω από αυτό και πώς οι μέθοδοι εργασίας θα πρέπει να προσαρμοστούν για να τις προσαρμόσουν καθώς εξελίσσεται η χρήση του, θα χρειαστούν περισσότεροι επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου. Η καρδιά του BIM είναι τα καλά δομημένα δεδομένα, τα οποία θα επιτρέψουν τεράστια αποτελεσματικότητα στον κατασκευαστικό κλάδο, ώστε σε ολόκληρη την ομάδα του έργου και τυποποιημένα, να υπάρχει πλήρης συνεργασία.

Καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του κτιρίου, τα μοντέλα BIM μπορούν να θεωρηθούν ως ένα αποθετήριο πληροφοριών που έχουν δημιουργηθεί και διαχειριστεί, καθώς και η ποιότητα και η υψηλή ποσότητα αυτών των πληροφοριών χαρακτηρίστηκαν. Η κατασκευή, η λειτουργία, ο καλύτερος σχεδιασμός και η συντήρηση ενός συγκεκριμένου κτιρίου διευκολύνονται μέσω της εύκολης πρόσβασης σε πληροφορίες. Για την παρακολούθηση της φθοράς και των ζημιών σε αυτές τις κατασκευές για τον σχεδιασμό προσπαθειών συντήρησης ή/και αποκατάστασης, υπάρχει πλέον επείγουσα ανάγκη. Τα υπάρχοντα κτίρια προσελκύουν αυξανόμενο ενδιαφέρον και διαχειρίζονται με τη μεθοδολογία BIM. Όσον αφορά τον σχεδιασμό έργων επισκευής και ανακαίνισης, αυτή η μέθοδος είναι κρίσιμη για την ψηφιακή μεταφορά πληροφοριών σχετικά με τις ιδιότητες τέτοιων κατασκευών (Mazzoli et al., 2021).

2.4 Τα κυριότερα BIM λογισμικά και οι δυνατότητές τους

Τα BIM λογισμικά αποτελούν τα βασικά ψηφιακά εργαλεία με τα οποία εφαρμόζεται η μεθοδολογία Building Information Modeling στον σχεδιασμό, στην κατασκευή και στη διαχείριση τεχνικών έργων. Η σύγχρονη βιβλιογραφία διακρίνει τα λογισμικά αυτά ανάλογα με τη βασική τους λειτουργία, καθώς άλλα χρησιμοποιούνται για δημιουργία μοντέλων, άλλα για έλεγχο και συντονισμό, άλλα για χρονοπρογραμματισμό και κοστολόγηση και άλλα για ανάλυση της βιωσιμότητας ή της λειτουργίας ενός κτιρίου. Οι Takyi-Annan και Zhang (2023) επισημαίνουν ότι ένα ολοκληρωμένο BIM έργο συνήθως απαιτεί συνδυασμό εργαλείων, καθώς το Revit, το Tekla Structures, το MicroStation και το ArchiCAD λειτουργούν κυρίως ως εργαλεία δημιουργίας σχεδιαστικών μοντέλων, ενώ το Navisworks συνδέεται

περισσότερο με χρονοπρογραμματισμό και κοστολόγηση και το Solibri με έλεγχο και επισκόπηση μοντέλων.

Το Autodesk Revit αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά BIM, καθώς επιτρέπει την ανάπτυξη αρχιτεκτονικών, στατικών και ηλεκτρομηχανολογικών μοντέλων μέσα σε ενιαίο παραμετρικό περιβάλλον. Η κύρια δυνατότητά του αφορά τη δημιουργία αντικειμένων που φέρουν γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως τοίχοι, δοκοί, υποστυλώματα, δάπεδα, ανοίγματα και μηχανολογικά συστήματα. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή σχεδίων, εξαγωγή ποσοτήτων, συντονισμό ειδικοτήτων και διασύνδεση με αναλυτικά λογισμικά. Οι Gerbino et al. (2021) εξετάζουν το Revit στο πλαίσιο της διαλειτουργικότητας μέσω IFC και δείχνουν ότι η ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα σε αρχιτεκτονικά και στατικά περιβάλλοντα αποτελεί βασικό ζήτημα για τη λειτουργική χρήση του BIM.

Το Graphisoft ArchiCAD συνδέεται κυρίως με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και την παραγωγή ολοκληρωμένων μοντέλων κτιρίων. Η βασική του αξία βρίσκεται στη δημιουργία εικονικού κτιρίου, δηλαδή ενός ψηφιακού μοντέλου που περιλαμβάνει αρχιτεκτονική πληροφορία, τεκμηρίωση, σχέδια, όψεις, τομές και τρισδιάστατη απεικόνιση. Στη βιβλιογραφία, το ArchiCAD αναφέρεται συχνά μαζί με το Revit, το Tekla και το Allplan ως βασικό εργαλείο τρισδιάστατης BIM μοντελοποίησης που υποστηρίζει πιστοποιημένες ροές εργασίας και ανταλλαγή δεδομένων μέσω ανοικτών προτύπων, όπως το IFC (Vite & Morbiducci, 2021).

Το Tekla Structures χρησιμοποιείται κυρίως στη στατική και κατασκευαστική μοντελοποίηση, ιδιαίτερα σε έργα χάλυβα, οπλισμένου σκυροδέματος και προκατασκευασμένων στοιχείων. Η δύναμή του εντοπίζεται στη λεπτομερή αποτύπωση κατασκευαστικών στοιχείων, στη μοντελοποίηση συνδέσεων, στην παραγωγή κατασκευαστικών σχεδίων και στην εξαγωγή πληροφοριών για την υλοποίηση του έργου. Οι Singh et al. (2024) αναφέρουν ότι εφαρμογές όπως Revit, Navisworks, ArchiCAD και Tekla Structures εντάσσονται στα BIM λογισμικά που υποστηρίζουν εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων σε IFC, στοιχείο κρίσιμο για τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών ειδικοτήτων και λογισμικών.

Το Bentley OpenBuildings και τα συγγενή εργαλεία της Bentley αξιοποιούνται σε σύνθετα έργα υποδομών και κτιριακού σχεδιασμού, με έμφαση στη

συνεργασία πολλών ειδικοτήτων και στη διαχείριση μεγάλων τεχνικών έργων. Σε αντίστοιχη κατηγορία εντάσσεται και το Allplan, το οποίο χρησιμοποιείται για αρχιτεκτονική και στατική μοντελοποίηση. Οι Vite και Morbiducci (2021) καταγράφουν τα ArchiCAD, Revit, Tekla και Allplan ως συχνά εργαλεία τρισδιάστατης BIM γεωμετρικής μοντελοποίησης, ενώ αναφέρουν ότι το Navisworks, το Solibri και το BIMcollab χρησιμοποιούνται περισσότερο για συνεργασία, συντονισμό και έλεγχο μοντέλων.

Το Navisworks έχει ιδιαίτερη σημασία στη φάση συντονισμού του έργου, καθώς επιτρέπει τη συνένωση μοντέλων από διαφορετικές ειδικότητες, τον εντοπισμό συγκρούσεων ανάμεσα σε αρχιτεκτονικά, στατικά και ηλεκτρομηχανολογικά στοιχεία και τη σύνδεση του μοντέλου με τον χρονοπρογραμματισμό. Το Solibri, από την άλλη πλευρά, λειτουργεί κυρίως ως εργαλείο ελέγχου ποιότητας του μοντέλου, καθώς υποστηρίζει επισκόπηση, ανίχνευση συγκρούσεων, έλεγχο κανόνων και αξιολόγηση της πληρότητας των BIM δεδομένων. Η διάκριση αυτή επιβεβαιώνεται από τους Takyi-Annan και Zhang (2023), οι οποίοι ταξινομούν το Solibri, το Tekla BIMsight και το Trimble Connect ως εργαλεία επισκόπησης μοντέλων με δυνατότητες αναζήτησης, διερεύνησης και ελέγχου συγκρούσεων.

Συνολικά, τα κυριότερα BIM λογισμικά συγκροτούν ένα σύστημα εργαλείων και όχι μια ενιαία εφαρμογή. Το Revit, το ArchiCAD, το Tekla Structures, το OpenBuildings και το Allplan καλύπτουν κυρίως τη δημιουργία και ανάπτυξη μοντέλων. Το Navisworks, το Solibri, το BIMcollab και το Trimble Connect υποστηρίζουν τον συντονισμό, τον έλεγχο και την ανταλλαγή πληροφοριών. Το Synchro και παρόμοια εργαλεία εξυπηρετούν κυρίως τη σύνδεση του μοντέλου με τον χρόνο και το κόστος. Η σύγχρονη τάση οδηγεί προς το openBIM και τη χρήση ανοικτών προτύπων, ώστε τα δεδομένα να μεταφέρονται αποτελεσματικά ανάμεσα σε διαφορετικά λογισμικά και στάδια του κύκλου ζωής του έργου (Gerbino et al., 2021; Singh et al., 2024).

Κεφάλαιο 3: Χρησιμότητα και αποτελεσματικότητα των BIM προγραμμάτων

3.1 Οφέλη από την εφαρμογή του BIM

Οι σύγχρονες δυνατότητες των BIM μπορούν να λύσουν πολλά προβλήματα και αδυναμίες που υποδηλώνουν έλλειψη συνέπειας στην ανάπτυξη και ανταλλαγή ψηφιακών πληροφοριών, όπως η ένταση πόρων και η ελάχιστη αποτελεσματικότητα στη διαχείριση των διαδικασιών σχεδιασμού, κατασκευής, λειτουργίας και η έλλειψη αποτελεσματικής διαχείρισης του κύκλου ζωής των εγκαταστάσεων, καθώς και η ανεπάρκεια της κανονιστικής υποστήριξης για τις σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευών κ.λπ. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, πολλές χώρες προτείνουν την εισαγωγή τεχνολογιών BIM, οι οποίες συνίστανται στην ανάπτυξη και την κοινή χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου που μπορεί να περιέχει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά βάσει των οποίων αναπτύσσεται η τεκμηρίωση σχεδιασμού και εκτίμησης (Šimenić, 2021).

Το ψηφιακό μοντέλο, που δημιουργείται χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο λογισμικό, επιτρέπει την ενσωμάτωση πληροφοριών που σχετίζονται με φυσικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας BIM έναντι των παραδοσιακών μεθόδων σχεδιασμού έγκειται στην ικανότητά της να ενώνει επαγγελματίες αρχιτεκτονικής, μηχανικής και κατασκευών μέσω μιας κοινής βάσης δεδομένων ψηφιακών μοντέλων. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου. Κατά την ανάπτυξη και λειτουργία ενός κτιρίου, τα δεδομένα του μοντέλου επιτρέπουν την απόκτηση πολύτιμων πληροφοριών σχετικά με τα στοιχεία κατασκευής και τις διασυνδέσεις μεταξύ των στοιχείων του μοντέλου. Ο προσδιορισμός των απαραίτητων πόρων (υλικών) και η ελαχιστοποίηση του χρόνου υλοποίησης του έργου στο εργοτάξιο είναι ζωτικής σημασίας. Επιπλέον, τυχόν αλλαγές που γίνονται στα στοιχεία του μοντέλου επιτρέπουν γρήγορες και ακριβείς ενημερώσεις σε όλα τα σχετικά τμήματα των ψηφιακών σχεδίων (Krasovskaya et al., 2021).

Αρχικά, ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του BIM είναι η προσαρμοστικότητά του, καθώς το μοντέλο μπορεί να γίνει αποδεκτό σε οποιοδήποτε

στάδιο κατασκευής και υποδομής, τόσο κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού όσο και κατά τη φάση λειτουργίας και μετά την κατασκευή. Η φάση σχεδιασμού περιλαμβάνει την εφαρμογή πτυχών αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, δομικής ανάλυσης, μηχανολογικών, ηλεκτρικών και υδραυλικών αξιολογήσεων, καθώς και περιβαλλοντικών και ενεργειακών αξιολογήσεων για σκοπούς ανάλυσης. Η εφαρμογή του BIM κατά την κατασκευή περιλαμβάνει την παρακολούθηση της προόδου και την αντιμετώπιση ζητημάτων ασφάλειας. Αντίθετα, η φάση μετά την κατασκευή σχετίζεται με την παρακολούθηση της λειτουργίας του κτιρίου, συνήθως από την οπτική γωνία των ψηφιακών διδύμων και την εφαρμογή τεχνολογιών μηχανικής μάθησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το BIM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των λειτουργιών του κτιρίου μετά την ολοκλήρωση και αντικατοπτρίζει την πραγματική ενεργειακή απόδοση (Panteli & Fokaides, 2020).

Επιπρόσθετα, η εφαρμογή και ανάπτυξη τεχνολογίας BIM έχει προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στις βιομηχανικές και κατασκευαστικές βιομηχανίες. Η χρήση του BIM συνδέεται με οφέλη όπως η εξάλειψη απρόβλεπτων διακυμάνσεων στον προϋπολογισμό, η βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης κόστους και η μείωση του χρόνου για τη σύνταξη εκτιμήσεων κόστους και χρονοδιαγραμμάτων έργων (Sepasgozar et al., 2022).

Αναλυτικότερα, οι El Mounla et al., (2023) υποδεικνύουν ότι η ανάπτυξη της τεχνολογίας πληροφοριών επιτρέπει την εξοικονόμηση κόστους και χρόνου στις δραστηριότητες έργων και κατασκευής και διευκολύνει την αποτελεσματική ενσωμάτωση των εισροών από τους εργολάβους και τους προμηθευτές κατά τη φάση σχεδιασμού, βελτιώνοντας την κατασκευαστική απόδοση των έργων. Οι μελέτες των Darko et al., (2020) και Bello et al., (2021) εντόπισαν βασικά πλεονεκτήματα του BIM, τα οποία περιλαμβάνουν:

- άμεση ανίχνευση συγκρούσεων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων κτιρίων
- μείωση του κατακερματισμού στον κατασκευαστικό κλάδο·
- δυνατότητα απρόσκοπτης ενσωμάτωσης διάφορων τομέων του κλάδου·
- ενίσχυση της αποτελεσματικότητας στον τομέα·
- μείωση του κόστους που σχετίζεται με την ανταλλαγή και αξιοποίηση πληροφοριών μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών του έργου·

– παροχή μιας εναλλακτικής λύσης για τον συντονισμό του σχεδιασμού, καθώς τα έργα μπορούν να εξεταστούν σε ένα ψηφιακό μοντέλο.

Οι Rodrigues et al., (2020) περιέγραψαν πώς, για ένα ολόκληρο έργο, οι συγκρούσεις σχεδιασμού μεταξύ των σχεδιαστών θα μπορούσαν να ανέλθουν σε δεκάδες χιλιάδες παρατηρήσεις, καθιστώντας μια τέτοια προσέγγιση μη ικανοποιητική μακροπρόθεσμα. Ακόμη, οι Ding et al., (2019) ανέλυσαν ότι το BIM συμβάλλει στην ταχεία οπτικοποίηση και στις ακριβείς ενημερώσεις αλλαγών κατά το στάδιο της εννοιολογικής ανάπτυξης του κτιριακού έργου, βελτιώνοντας την επικοινωνία μεταξύ των ομάδων σχεδιασμού του έργου και ενισχύοντας τη συνεργασία μεταξύ αρχιτεκτόνων και μηχανικών στην ομάδα ανάπτυξης. Οι συγγραφείς υπέθεσαν ότι η βελτίωση της ποιότητας του αρχιτεκτονικού και μηχανικού σχεδιασμού όσον αφορά τα σχέδια χωρίς σφάλματα οδηγεί σε συνεχή αύξηση της παραγωγικότητας της εργασίας.

Επιπρόσθετα, η συμμόρφωση με τους κανόνες ασφαλείας κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση των κτιρίων είναι εξίσου σημαντική κατά το σχεδιασμό ενός ψηφιακού μοντέλου BIM. Οι Wang et al., (2024) πρότειναν μια μέθοδο αξιολόγησης που, σε συνδυασμό με την τεχνολογία BIM, επιτρέπει την γρήγορη και αξιόπιστη αξιολόγηση του κινδύνου πυρκαγιάς του μοντέλου-στόχου κτιρίου και πραγματοποιεί μια οργανική ενότητα επιστήμης, αποδοτικότητας και οικονομίας. Επιπλέον, οι συγγραφείς ανέπτυξαν ένα μοντέλο υπολογισμού κινδύνου για τις περιόδους λειτουργίας και συντήρησης για την ενίσχυση της ικανότητας πυρασφάλειας των κτιρίων. Η φάση λειτουργίας του κύκλου ζωής ενός κτιρίου μπορεί να καταναλώσει σημαντικό μικρή ποσότητα ενέργειας, οδηγώντας σε σημαντικό αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Ενώ η ενεργειακή μοντελοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί ως εργαλείο για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης ενός λειτουργικού κτιρίου, η εμφάνιση της τεχνολογίας BIM διευκολύνει τη διαδικασία αξιολόγησης μέσω καθορισμένων και εμπλουτισμένων πληροφοριών για το κτίριο. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση έχει ένα μειονέκτημα που αφορά το ζήτημα της συμβατότητας μεταξύ των εργαλείων λογισμικού BIM και των εργαλείων ενεργειακής μοντελοποίησης, και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης σπάνια επαληθεύονται λόγω της έλλειψης αντίστοιχων πειραματικών δεδομένων.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο κατασκευαστικός τομέας και οι κτιριακές λειτουργίες αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 43% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στη χώρα. Επιπλέον, κατά τη φάση λειτουργίας, τα κτίρια καταναλώνουν το 87% και το 84% της συνολικής ενέργειας στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες, αντίστοιχα. Επομένως, στον αγώνα με μια επιβλαβή επιρροή, η φάση λειτουργίας του κύκλου ζωής ενός κτιρίου αποκτά πρακτική σημασία, όπου η ενεργειακή μοντελοποίηση μπορεί να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην πρόβλεψη της ενεργειακής απόδοσης, στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του κτιρίου (Li & Mills, 2020).

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα σύνθετα κατασκευαστικά έργα προϋποθέτουν τη συνεργασία πολλών οργανισμών, καθώς η υλοποίησή τους στηρίζεται σε ένα πλέγμα σχέσεων ανάμεσα σε φορείς με διαφορετικούς ρόλους, αρμοδιότητες και τεχνικές εξειδικεύσεις (Maurer, 2010). Στο πλαίσιο τέτοιων διαοργανωσιακών έργων, η εμπιστοσύνη μεταξύ των συνεργαζόμενων μερών αναγνωρίζεται ως κρίσιμος παράγοντας επιτυχίας, επειδή επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της συνεργασίας, την ανταλλαγή πληροφοριών και την ικανότητα των εταίρων να λαμβάνουν συντονισμένες αποφάσεις (Kadefors, 2004; Maurer, 2010). Η φύση της εργασίας στα κατασκευαστικά έργα, όπου συμμετέχουν μελετητές, ανάδοχοι, υπεργολάβοι, προμηθευτές, πελάτες και διαχειριστές έργου, δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για ενσωμάτωση, συνεργασία και συντονισμό των ομάδων έργου (Cicmil και Marshall, 2005, cited in Maunula, 2008).

Μέσα σε αυτό το περιβάλλον, τα Inter Organizational Information Systems, δηλαδή πληροφοριακά συστήματα που υποστηρίζουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών οργανισμών, αποτελούν έναν σημαντικό μηχανισμό αντιμετώπισης των προβλημάτων συντονισμού και ολοκλήρωσης στον κατασκευαστικό τομέα (Maunula, 2008). Στη βιβλιογραφία τα συστήματα αυτά εμφανίζονται με διαφορετικές ονομασίες, όπως Web based PM Systems, δηλαδή διαδικτυακά συστήματα διαχείρισης έργων, Web Collaborative Extranets, δηλαδή διαδικτυακά συνεργατικά εξωτερικά δίκτυα, ή Document Management Systems, δηλαδή συστήματα διαχείρισης εγγράφων (Forcada et al., 2007; Nitithamyong και Skibniewski, 2004; Ajam et al., 2010). Παρά τη διαφοροποίηση στην ορολογία, ο βασικός τους σκοπός παραμένει κοινός, καθώς διευκολύνουν την έγκαιρη, ακριβή και

οργανωμένη ανταλλαγή πληροφοριών, στοιχείο που συνδέεται στενά με την επιτυχή έκβαση ενός έργου (Anumba et al., 2008).

Επιπλέον, η κατασκευαστική βιομηχανία χαρακτηρίζεται από έντονο κατακερματισμό, καθώς οι ομάδες έργου συχνά συγκροτούνται προσωρινά και διαλύονται μετά την ολοκλήρωση του έργου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γνώση που παράγεται σε ένα έργο να αξιοποιείται με περιορισμένη συστηματικότητα σε επόμενα έργα. Το BIM μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση και οργάνωση αυτής της γνώσης μέσα από κοινά ψηφιακά μοντέλα και δομημένες βάσεις δεδομένων, ενώ η έκταση στην οποία μπορεί να αντιμετωπίσει πλήρως αυτό το διαρθρωτικό πρόβλημα της βιομηχανίας εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό ζήτημα για τη μελλοντική έρευνα και πρακτική εφαρμογή (Lindner και Wald, 2011).

Αναλυτικότερα, η παραδοσιακή εργασία μέσω εγγράφων δημιουργεί κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός έργου μια συνεχή ροή κειμενικών και γραφικών πληροφοριών, οι οποίες συχνά έχουν χαλαρή δομή και περιορισμένη δυνατότητα άμεσης επεξεργασίας (BSI, 2010). Η κατάσταση αυτή δυσχεραίνει την εφαρμογή περισσότερο ολοκληρωμένων πρακτικών, καθώς η πληροφορία που ανταλλάσσεται σε επίπεδο εγγράφου συχνά χαρακτηρίζεται από ασάφεια, έλλειψη τυποποίησης και αυξημένη ανάγκη ερμηνείας (Ajam et al., 2010). Οι Ajam et al. (2010) υποστηρίζουν ότι η ουσιαστική αξιοποίηση ενός διαοργανωσιακού πληροφοριακού συστήματος απαιτεί μετάβαση από την απλή ανταλλαγή εγγράφων στην ανταλλαγή πληροφορίας σε επίπεδο αντικειμένου ή δομικού στοιχείου. Σε αυτή τη μετάβαση, τα BIM, μπορεί να λειτουργήσει ως βασική μεθοδολογική και τεχνολογική προσέγγιση, καθώς μετακινεί το επίκεντρο από το μεμονωμένο έγγραφο προς ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό περιβάλλον δεδομένων.

Ο Allison (2010), εξετάζει τη δυναμική του BIM ως εργαλείου διοίκησης έργου και παρουσιάζει δέκα λόγους για τους οποίους οι διαχειριστές έργων μπορούν να υποστηρίξουν ενεργά την υιοθέτηση του 5D BIM. Πρώτον, βοηθά στην καλύτερη οργάνωση του χρονοδιαγράμματος και του προϋπολογισμού ήδη από το στάδιο της προ κατασκευής, καθώς κάθε αλλαγή στον σχεδιασμό μπορεί να αποτυπώνεται άμεσα τόσο στο κόστος όσο και στον χρονικό προγραμματισμό. Δεύτερον, ενισχύει τη συνεργασία του project manager με την ομάδα σχεδιασμού, επειδή παρέχει τη δυνατότητα οπτικοποίησης των αλλαγών και εκτίμησης των συνεπειών τους στο

αντικείμενο του έργου. Με αυτόν τον τρόπο, ο project manager μπορεί να λειτουργήσει ως αξιόπιστος σύνδεσμος ανάμεσα στους μελετητές και τον κύριο του έργου. Τρίτον, το 5D BIM διευκολύνει την επιλογή, τον συντονισμό και τον έλεγχο των υπεργολάβων, καθώς η ανίχνευση συγκρούσεων και η καλύτερη τεχνική συνεννόηση καθιστούν την εργασία τους πιο προβλέψιμη. Τέταρτον, συμβάλλει στον περιορισμό των αιτημάτων πληροφόρησης και των εντολών αλλαγής, επειδή η διαδικασία συντονισμού ξεκινά νωρίτερα και επιτρέπει την επίλυση τεχνικών ζητημάτων πριν αυτά μεταφερθούν στο εργοτάξιο. Πέμπτον, παρέχει στον project manager μια λειτουργική εικόνα της τρέχουσας κατάστασης του έργου, αντί για μια καθυστερημένη αποτύπωση των προβλημάτων. Η συνεχής παρακολούθηση της απόδοσης των υπεργολάβων μπορεί να υποστηρίξει βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό και έγκαιρες προειδοποιήσεις για πιθανές καθυστερήσεις. Έκτον, βελτιώνει την εμπειρία και την ικανοποίηση του κυρίου του έργου, καθώς η έγκαιρη και εντός προϋπολογισμού παράδοση αποτελεί βασικό κριτήριο επιτυχίας. Έβδομον, υποστηρίζει την ολοκλήρωση και παράδοση του έργου μαζί με χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία και τη συντήρηση του κτιρίου, όπως εγγυήσεις, τεχνικές προδιαγραφές και προγράμματα συντήρησης. Όγδοον, συμβάλλει στη διατήρηση του περιθωρίου κέρδους, επειδή η πληρέστερη κατανόηση του έργου σε πέντε διαστάσεις παρέχει περισσότερα εργαλεία ελέγχου, παρακολούθησης και λήψης αποφάσεων. Ένατον, η εξειδίκευση στο BIM καθιστά τον project manager ιδιαίτερα χρήσιμο σε έργα όπου οι προοδευτικοί κύριοι έργων απαιτούν πλέον την εφαρμογή ψηφιακών μοντέλων. Τέλος, η επιτυχής χρήση του 5D BIM μπορεί να ενισχύσει τη φήμη της εταιρείας και να συμβάλει στην απόκτηση νέων έργων, καθώς αποδεικνύει οργανωτική ωριμότητα, τεχνολογική επάρκεια και ικανότητα αποτελεσματικής παράδοσης έργων (Allison, 2010).

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για το BIM συνδέεται επίσης με νεότερα πλαίσια διοίκησης έργων, όπως το Integrated Project Delivery, δηλαδή η ολοκληρωμένη παράδοση έργου, η οποία στηρίζεται σε πιο στενή συνεργασία, διαμοιρασμό ευθύνης και αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων (Eastman et al., 2011). Όταν διαφορετικοί φορείς συνεργάζονται σε ένα έργο, η επικοινωνία των τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του έργου απαιτεί τεκμηρίωση, κοινή κατανόηση και σαφή απεικόνιση των αποφάσεων (Lee, 2008). Παραδοσιακά, αυτή η τεκμηρίωση στηριζόταν σε χαρτί ή σε ανεξάρτητα ψηφιακά έγγραφα (BSI, 2010). Το BIM

μεταφέρει τα παραδοσιακά εργαλεία της κατασκευαστικής διαδικασίας σε ένα ενιαίο εικονικό περιβάλλον και ενισχύει την αποδοτικότητα, την επικοινωνία και τη συνεργασία σε βαθμό υψηλότερο από εκείνον που επιτρέπουν οι συμβατικές διαδικασίες κατασκευής (Lee, 2008).

Η συντονισμένη διαχείριση σύνθετων συστημάτων έργου αποτελεί σήμερα μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές του BIM, καθώς η μεθοδολογία αυτή ευνοεί την ανάπτυξη τεχνικών συνεργασίας και τη διαμόρφωση κοινών πρωτοκόλλων δέσμευσης μεταξύ των μελών της ομάδας (Grilo και JardimGoncalves, 2010). Παράλληλα, το BIM έχει συνδεθεί με την ανάπτυξη λιτών προσεγγίσεων στη διοίκηση έργων. Η ενισχυμένη συνεργασία και η συστηματικότερη ανταλλαγή πληροφοριών μπορούν να συμβάλουν στον στόχο της λιτής διοίκησης, η οποία επιδιώκει τη μείωση διαδικασιών, ενεργειών και πόρων που παράγουν περιορισμένη αξία για το τελικό αποτέλεσμα (Olatunji, 2011).

Έτσι λοιπόν, η χρησιμότητα του BIM εκτείνεται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Ο κύριος του έργου μπορεί να το αξιοποιήσει για να κατανοήσει καλύτερα τις ανάγκες και τις προδιαγραφές του έργου. Η ομάδα μελέτης μπορεί να το χρησιμοποιήσει για ανάλυση, σχεδιασμό και ανάπτυξη των λύσεων. Ο ανάδοχος μπορεί να το αξιοποιήσει για την οργάνωση και διαχείριση της κατασκευαστικής διαδικασίας. Ο διαχειριστής εγκαταστάσεων, μπορεί να το χρησιμοποιήσει κατά τη λειτουργία, τη συντήρηση και την τελική αποξήλωση ή ανακατασκευή του έργου (Grilo και Jardim Goncalves, 2010). Αυτή η δυνατότητα διαχρονικής χρήσης καθιστά το BIM περισσότερο από ένα σχεδιαστικό εργαλείο, καθώς το μετατρέπει σε πλατφόρμα πληροφορίας που υποστηρίζει αποφάσεις σε όλη τη διάρκεια ζωής του κατασκευαστικού αντικειμένου.

Ακόμη, το BIM μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για τον ανασχεδιασμό των διαδικασιών της διοίκησης έργων, επειδή ενισχύει την ολοκλήρωση των διαφορετικών εμπλεκόμενων σε σύγχρονα κατασκευαστικά έργα. Ο ανασχεδιασμός αυτός έχει συσχετιστεί με την εφαρμογή λιτών αρχών στη διοίκηση και οργάνωση έργων. Οι Arayici et al. (2011) διατυπώνουν επτά βασικούς πυλώνες για μια στρατηγική εφαρμογής BIM, οι οποίοι αφορούν την εξάλειψη σπατάλης, την ενίσχυση της ανατροφοδότησης, την αναβολή κρίσιμων αποφάσεων μέχρι τη διαμόρφωση συναίνεσης, την ταχύτερη παράδοση, την ενσωμάτωση ακεραιότητας

στις διαδικασίες, την ενδυνάμωση της ομάδας και τη συνολική θεώρηση του έργου. Μέσω αυτών των αρχών, οι διαχειριστές έργων μπορούν να επιδιώξουν καλύτερα παραδοτέα, υψηλότερη ποιότητα διαδικασιών και πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα.

Οι project managers βρίσκονται σε ιδιαίτερα σημαντική θέση για την προώθηση του BIM, επειδή επηρεάζουν τη στελέχωση, την οργάνωση και την κατανομή πόρων στις ομάδες έργου (Gu και London, 2010). Κατά συνέπεια, μπορούν να λειτουργήσουν τόσο ως αποδέκτες των δυνατοτήτων του BIM όσο και ως φορείς ενεργητικής προώθησής του μέσα στον οργανισμό και στο ευρύτερο δίκτυο συνεργατών. Ο ρόλος τους αποκτά στρατηγική σημασία, καθώς η επιτυχής εφαρμογή του BIM εξαρτάται από τεχνολογικούς παράγοντες, οργανωτικές πρακτικές, επαγγελματικές δεξιότητες και κουλτούρα συνεργασίας.

Από όλα τα παραπάνω έγινε σαφές ότι η αξιοποίηση του BIM , αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον σύγχρονο αρχιτεκτονικό, τεχνικό και κατασκευαστικό κλάδο. Η μετάβαση από τα συμβατικά δισδιάστατα σχέδια σε τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα ενισχύει την ακρίβεια, την ταχύτητα και τον συντονισμό των έργων, καθώς συγκεντρώνει τεχνικές, χωρικές και λειτουργικές πληροφορίες σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, οι μελετητές, οι μηχανικοί, οι εργολάβοι και οι λοιποί εμπλεκόμενοι αποκτούν κοινή εικόνα του έργου και μπορούν να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σε όλα τα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής (Autodesk, 2015).

Συνοψίζοντας, πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του BIM αποτελεί η ακριβής αποτύπωση της υφιστάμενης πραγματικότητας. Η χρήση χαρτογραφικών δεδομένων, αεροφωτογραφιών, ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων και σαρώσεων με λέιζερ επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση του χώρου πριν από την έναρξη του έργου. Με τον τρόπο αυτό, ο σχεδιασμός βασίζεται σε πληρέστερη πληροφορία και αποκτά μεγαλύτερη τεχνική αξιοπιστία. Παράλληλα, το BIM συμβάλλει στη μείωση της επανάληψης εργασιών, επειδή το κοινό ψηφιακό μοντέλο περιλαμβάνει στοιχεία που μπορούν να ενημερώνονται αυτόματα, όπως ποσότητες υλικών, διαστάσεις ανοιγμάτων και τεχνικά χαρακτηριστικά επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων. Αυτή η δυνατότητα ενισχύει την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους, καθώς μειώνει τα σφάλματα στους υπολογισμούς και επιταχύνει τη διαδικασία προμέτρησης (Autodesk, 2015).

Επιπλέον, το BIM βελτιώνει ουσιαστικά τη συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών ειδικοτήτων. Η ανταλλαγή μοντέλων μέσω ψηφιακών και υπολογιστικών πλατφορμών επιτρέπει σε κάθε ομάδα να ελέγχει, να σχολιάζει και να συντονίζει το δικό της αντικείμενο με τις υπόλοιπες τεχνικές παρεμβάσεις. Ιδιαίτερη σημασία έχει και η δυνατότητα έγκαιρου εντοπισμού συγκρούσεων, όπως η επικάλυψη ηλεκτρομηχανολογικών δικτύων με φέροντα στοιχεία. Μέσα από τον ψηφιακό έλεγχο των συγκρούσεων, τα προβλήματα αναγνωρίζονται στο στάδιο της μελέτης και η κατασκευή προχωρά με μεγαλύτερη ασφάλεια και προβλεψιμότητα (Autodesk, 2015).

Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί επίσης η δυνατότητα προσομοίωσης και οπτικοποίησης. Το BIM επιτρέπει τη μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας, της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου και της κατασκευαστικής αλληλουχίας, παρέχοντας ένα εργαλείο υψηλής αξίας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του έργου. Το τρισδιάστατο μοντέλο λειτουργεί και ως μέσο παρουσίασης, διευκολύνοντας την επικοινωνία με επενδυτές, πελάτες, δημόσιες αρχές και τεχνικές ομάδες. Τέλος, η σύνδεση του μοντέλου με βάση δεδομένων και η πρόσβαση μέσω υπολογιστικού νέφους επιτρέπουν τη διαχείριση πληροφοριών από διαφορετικές συσκευές και σημεία εργασίας, γεγονός που καθιστά το BIM ένα σύγχρονο εργαλείο ολοκληρωμένης διαχείρισης έργων (Autodesk, 2015).

3.2 Δυσκολίες και προκλήσεις εφαρμογής

Παρά τα αναγνωρισμένα οφέλη, η αποτελεσματική αξιοποίηση του BIM προϋποθέτει την αντιμετώπιση σημαντικών προκλήσεων. Η πολυεπιστημονική συνεργασία, η αναδιαμόρφωση ρόλων και η μετάβαση σε νέες διαδικασίες απαιτούν προσαρμογή από πελάτες, αρχιτέκτονες, αναδόχους, υπεργολάβους και προμηθευτές. Παράλληλα, η υιοθέτηση νέων συμβατικών σχέσεων και συνεργατικών διαδικασιών μεταβάλλει τους παραδοσιακούς τρόπους οργάνωσης των κατασκευαστικών έργων (Sebastian, 2011). Ένας από τους ρόλους που επηρεάζονται άμεσα από την εισαγωγή του BIM είναι ο ρόλος του project manager. Η επίδραση της ενισχυμένης τεχνολογικής χρήσης στις καθημερινές δραστηριότητες του διαχειριστή έργου και

στα τελικά αποτελέσματα του έργου παραμένει ανοιχτό πεδίο διερεύνησης (Aranda Mena et al., 2009).

Έτσι λοιπόν, παρά τα πολλά απτά οφέλη που υπάρχουν σε αυτό το εργαλείο, το πλήρες δυναμικό και οι δυνατότητες του BIM δεν έχουν διερευνηθεί. Πολλές μελέτες έχουν προσπαθήσει να ξεδιαλύνουν τον γόρδιο δεσμό των προκλήσεων για την υιοθέτηση του BIM, εξετάζοντας πράγματα όπως το επίπεδο αποδοχής μέχρι στιγμής (Olanrewaju et al., 2020) , τη φύση των εμποδίων (Ianrewaju et al., 2020; Babatunde et al., 2019) και τα κίνητρα (Eadie et al., 2013; Olawumi & Chan, 2019).

Μία από τις κύριες προκλήσεις για την υιοθέτηση του BIM, την οποία αναφέρουν οι Aranda-Mena et al. (2009), είναι η ασυμβατότητα διαφορετικών προγραμμάτων BIM. Στο ίδιο πλαίσιο, οι Ku και Taiebat (2011) δηλώνουν ότι επειδή διαφορετικά προγράμματα δεν συνεργάζονται πολύ καλά, τα δεδομένα που δημιουργούνται σε ένα πρόγραμμα πρέπει να αποθηκεύονται σε ένα άλλο αντί να κοινοποιούνται μεταξύ προγραμμάτων, κάτι που αντίκειται στον πρωταρχικό σκοπό της χρήσης του BIM. Αυτό, σε κάποιο βαθμό, εμποδίζει την εφαρμογή του BIM από ορισμένους ενδιαφερόμενους και ιδιοκτήτες που πιστεύουν ότι η επανεισαγωγή πληροφοριών αναιρεί τα διάφορα πλεονεκτήματα που μπορεί να έχει το BIM στην υλοποίηση του έργου (Nanajkar & Gao, 2014). Επιπλέον, σπάνια υπάρχουν λύσεις υποστήριξης λογισμικού BIM μεταξύ μικρών και μεσαίων επιχειρήσεων (MME) (Vidalakis, Abanda & Oti, 2019).

Επιπρόσθετα, έχουν τεθεί και νομικά προβλήματα σχετικά με το ποιος κατέχει τις διάφορες πληροφορίες σχεδιασμού, κατασκευής, ανάλυσης και κατασκευής που περιλαμβάνονται στα μοντέλα BIM λόγω της ασυνήθιστης φύσης των δεδομένων που περιέχονται σε αυτά (Ibrahim, 2016). Επιπλέον, το επίπεδο λογοδοσίας από τους ειδικούς και το άτομο που είναι υπεύθυνο για την ανακρίβεια του σχεδιασμού αποτελεί μεγάλο πρόβλημα κατά την εξέταση των εμποδίων BIM (Aranda-Mena et al., 2009). Είναι ευκολότερο να αποδοθούν ευθύνες για τις ελλείψεις ενός έργου στην παραδοσιακή διαδικασία σχεδιασμού που βασίζεται σε χαρτί παρά σε μια εφαρμογή BIM, όπου οι αρχιτέκτονες, οι μηχανικοί και άλλοι επαγγελματίες δεν μπορούν εύκολα να τις εντοπίσουν (Olawumi & Chan, 2019).

Η έρευνα του Chan (2014) δείχνει ότι η έλλειψη εκπαιδευμένων εργαζομένων αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό εμπόδιο στην ευρεία υιοθέτηση του BIM. Επιπλέον, ο

Sebastian (2011) υποστηρίζει ότι η ανεπάρκεια του σχεδιασμού του BIM να ενσωματώσει μια τέτοια τεχνολογία αιχμής καθιστά αδύνατη την εφαρμογή του σε έργα αυτού του τύπου λόγω κακού συντονισμού και προετοιμασίας των διαδικασιών σύμβασης. Δεδομένου ότι η εφαρμογή του BIM πρέπει να περιλαμβάνεται στη σύμβαση από την αρχή, δεν είναι αποδεκτή εάν ένα έργο δεν είναι κατάλληλα συντονισμένο και οι διαδικασίες δεν είναι σαφώς καθορισμένες (Prendeville et al., 2014).

Ως αποτέλεσμα των απαραίτητων τροποποιήσεων πριν από την ευρεία εφαρμογή του BIM, αρκετές εταιρείες το έχουν αποφύγει. Ένα κοινό μοντέλο κτιρίου κατά τη φάση σχεδιασμού και μια συντονισμένη συλλογή τεχνικών μοντελοποίησης κατά την κατασκευή και την παραγωγή ως βάση όλων των λειτουργιών και αλληλεπιδράσεων εργασίας είναι οι θεμελιώδεις αλλαγές που απαιτούνται για την υιοθέτηση των αρχών του BIM στις επιχειρήσεις (Ku & Taiebat, 2011).

Επιπλέον, ορισμένοι ειδικοί δεν έχουν αναγνωρίσει το BIM ως βιώσιμη εναλλακτική λύση στις συμβατικές διαδικασίες δόμησης, ίσως επειδή δεν βλέπουν προβλήματα με τις συμβατικές μεθόδους (Ku & Taiebat, 2011). Ακόμη, η έλλειψη ενός κανονιστικού πλαισίου (ειδικά ως αποτέλεσμα της έλλειψης οικονομικών οφελών, η οποία οδηγεί σε σπατάλη πόρων, συμπεριλαμβανομένης της εργασίας, των μεταφορών κ.λπ.) έχει αποθαρρύνει άλλους ιδιωτικούς τομείς από το να επιδιώξουν σοβαρά πρωτοβουλίες εφαρμογής του BIM. Η έλλειψη συμμετοχής των πελατών και των ενδιαφερόμενων μερών της βιομηχανίας, η ανεπαρκής ικανότητα της ομάδας BIM και η απουσία ενός υποστηρικτή του BIM αποτελούν περαιτέρω προκλήσεις για τις κατασκευαστικές εταιρείες στις αναδύομενες αγορές (Almuntaser, Sanni-Anibire, Hassanain, 2018).

Επίσης, ζητήματα ευθύνης για τον σχεδιασμό, την ιδιοκτησία, τα δικαιώματα ευρεσιτεχνίας, το ποιος θα πρέπει να κατασκευάζει και να διαχειρίζεται το BIM και τον τρόπο κατανομής ή κατανομής του κόστους υιοθέτησης βρίσκονται όλα στο επίκεντρο του αινίγματος υιοθέτησης/χρήσης του BIM (Piroozfar et al., 2019).

Συνοψίζοντας, οι οικονομικοί περιορισμοί, η έλλειψη επίγνωσης του BIM, η κακή γνώση της μεθοδολογίας BIM, η έλλειψη επίγνωσης και πλεονεκτημάτων του BIM, καθώς και η έλλειψη κυβερνητικής υποστήριξης αποτελούν τις βασικές και κρίσιμες προκλήσεις για το BIM (Gamil και Rahman, 2019). Η υιοθέτηση του BIM

παρεμποδίζεται άμεσα από παράγοντες όπως «η γεωγραφική θέση, η οικονομική κατάσταση του έθνους, η κυβερνητική πολιτική και η επιθυμία για αλλαγή». Ο Πίνακας 1 συγκεντρώνει μερικές από τις δυσκολίες που επισημάνθηκαν από διάφορους ακαδημαϊκούς.

Επιπρόσθετα, μία από τις βασικότερες δυσκολίες αφορά την έλλειψη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού, καθώς η επιτυχής υιοθέτηση του BIM απαιτεί επαγγελματίες με τεχνικές γνώσεις, ψηφιακές δεξιότητες και ικανότητα συνεργασίας σε διεπιστημονικά περιβάλλοντα. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα εκπαιδευμένων στελεχών καθιστά δυσχερέστερη την ενσωμάτωση του BIM στις καθημερινές διαδικασίες των επιχειρήσεων, ενώ η απουσία προσώπων που μπορούν να υποστηρίξουν ενεργά την αλλαγή μειώνει την οργανωτική ετοιμότητα για μετάβαση σε πιο ψηφιακές μορφές εργασίας (Kineber et al., 2023).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν επίσης οι συμβατικές και διαδικαστικές προκλήσεις. Η εφαρμογή του BIM χρειάζεται να προβλέπεται ήδη από τα αρχικά στάδια του έργου, ώστε να προσδιορίζονται με σαφήνεια οι ευθύνες, τα παραδοτέα, η διαχείριση των δεδομένων, η ιδιοκτησία του μοντέλου και η κατανομή του κόστους εφαρμογής. Όταν οι διαδικασίες συντονισμού και οι συμβατικές απαιτήσεις παραμένουν ασαφείς, η χρήση του BIM δυσκολεύεται να ενταχθεί ομαλά στην παραγωγική ροή του έργου. Για τον λόγο αυτό, η υιοθέτηση του BIM συνδέεται με την ανάγκη ανασχεδιασμού των υφιστάμενων πρακτικών, ώστε το κοινό ψηφιακό μοντέλο και οι συντονισμένες τεχνικές μοντελοποίησης να αποτελούν κεντρική βάση εργασίας κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την παραγωγή (Kineber et al., 2023).

Σημαντικό εμπόδιο αποτελεί και η στάση ορισμένων επαγγελματιών απέναντι στο BIM. Σε αρκετές περιπτώσεις, η προσκόλληση σε συμβατικές μεθόδους εργασίας και η περιορισμένη αναγνώριση της προστιθέμενης αξίας του BIM επιβραδύνουν την αποδοχή του. Η πρόκληση αυτή γίνεται εντονότερη σε αναδυόμενες αγορές, όπου το θεσμικό πλαίσιο, η κρατική υποστήριξη και οι πολιτικές εκπαίδευσης γύρω από το BIM βρίσκονται σε αρχικά στάδια ανάπτυξης. Η οικονομική επιβάρυνση, η χαμηλή ενημέρωση, η περιορισμένη γνώση της μεθοδολογίας και η έλλειψη συστηματικής καθοδήγησης από δημόσιους φορείς λειτουργούν ως παράγοντες που επηρεάζουν την

ταχύτητα και την ποιότητα εφαρμογής του BIM στον κατασκευαστικό τομέα (Kineber et al., 2023).

Ακόμη, οι προκλήσεις του BIM εμφανίζονται έντονα και στο επίπεδο της συνεργασίας μεταξύ των ειδικοτήτων σχεδιασμού. Η χρήση ολοκληρωμένων μοντέλων απαιτεί κοινή κατανόηση, τεχνική συμβατότητα και ουσιαστική αξιοποίηση των ψηφιακών εργαλείων στις συναντήσεις σχεδιασμού. Σε πρακτικό επίπεδο, οι μελετητές συχνά χρειάζεται να προσαρμόσουν τις πληροφορίες στα εξειδικευμένα μοντέλα τους, ενώ οι λίστες συγκρούσεων που παράγονται από τα λογισμικά συντονισμού χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία για να ανταποκριθούν στις πραγματικές ανάγκες του σχεδιασμού. Παρότι η ποιότητα των μελετών μπορεί να βελτιωθεί μέσα από τη χρήση BIM, η πλήρης συνεργατική αξιοποίησή του απαιτεί τεχνική ωρίμανση, αλλαγή επαγγελματικών πρακτικών και σταθερότερη ενσωμάτωση των ψηφιακών εργαλείων στην καθημερινή εργασία (Kerosuo et al., 2015).

Ακόμη μία κρίσιμη πρόκληση αφορά τη μετάβαση από το στάδιο του σχεδιασμού στο εργοτάξιο. Τα ψηφιακά μοντέλα χρειάζεται να περιλαμβάνουν επαρκές επίπεδο λεπτομέρειας, ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν πραγματικές κατασκευαστικές αποφάσεις. Όταν οι πληροφορίες που παραδίδονται στην εργοταξιακή ομάδα είναι ελλιπείς ή καθυστερημένες, οι μηχανικοί του έργου αναγκάζονται να χρησιμοποιούν πολλαπλά μοντέλα και διαφορετικά λογισμικά, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα της εργασίας. Η σύνδεση του BIM με τη διαχείριση λειτουργίας και συντήρησης παρουσιάζει επίσης απαιτήσεις, καθώς τα μοντέλα σχεδιασμού και τα λογισμικά συντήρησης έχουν αναπτυχθεί για διαφορετικές ανάγκες. Έτσι, η αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων από το BIM σε συστήματα διαχείρισης εγκαταστάσεων απαιτεί τεχνικές διεπαφές, σαφείς διαδικασίες ενημέρωσης του μοντέλου και ενεργό συμμετοχή των χρηστών σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου (Kerosuo et al., 2015).

Συνολικά, οι προκλήσεις του BIM υπερβαίνουν το επίπεδο της απλής τεχνολογικής εγκατάστασης. Αφορούν την εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού, τη διαμόρφωση θεσμικού πλαισίου, την αλλαγή συμβατικών σχέσεων, τον επανασχεδιασμό διαδικασιών, τη συνεργασία μεταξύ ειδικοτήτων και τη σύνδεση του σχεδιασμού με την κατασκευή και τη συντήρηση. Επομένως, η επιτυχής εφαρμογή του BIM απαιτεί οργανωτική ωριμότητα, σαφείς ρόλους, τεχνική διαλειτουργικότητα

και κουλτούρα συνεργασίας, ώστε η τεχνολογία να λειτουργήσει ως ολοκληρωμένο εργαλείο διοίκησης και παραγωγής γνώσης στον κατασκευαστικό κλάδο (Kineber et al., 2023; Kerosuo et al., 2015).

Η έλλειψη ενημέρωσης σχετικά με τα οφέλη του BIM, η έλλειψη ειδικών και η έλλειψη ζήτησης για BIM θεωρούνται τα υψηλότερα εμπόδια (Ullah et al., 2019). Οι Hasan και Rasheed (2019), αναφέρουν ως κύρια εμπόδια του BIM την αντίσταση στην αλλαγή, πιστεύοντας ότι το τρέχον λογισμικό και οι παραδοσιακές μέθοδοι είναι αρκετά και δεν χρειάζονται νέες τεχνολογίες. Αντίστοιχα, στην έρευνά τους, οι Sardroud et al. (2018), μελέτησαν τα εμπόδια που αντιμετωπίζει η εφαρμογή του (BIM) στον κατασκευαστικό κλάδο. Οι πιο κρίσιμες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας που εντοπίστηκαν σε αυτή τη μελέτη ήταν τα συμβατικά και νομικά εμπόδια, το σύστημα διαχείρισης, τα πολιτισμικά προβλήματα και τα οικονομικά ζητήματα και τα ζητήματα ασφάλειας.

Από την άλλη πλευρά, οι Hatem et al. (2018) υιοθέτησαν μια ποσοτική προσέγγιση διεξάγοντας ένα ερωτηματολόγιο που απευθύνεται σε επαγγελματίες για να διερευνήσουν τα εμπόδια του BIM. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν την αδυναμία των προσπαθειών της κυβέρνησης, την έλλειψη ειδικών στον τομέα του (BIM), την αντίσταση στην αλλαγή και την κακή γνώση σχετικά με τα οφέλη του (BIM) ως τα μεγαλύτερα πιθανά εμπόδια χρήσης του (BIM). Στη μελέτη του, ο Ahmed (2018) από το Μπαγκλαντές έδειξαν ότι τα πέντε πιο σημαντικά εμπόδια στην εφαρμογή του BIM είναι η κοινωνική και η συνήθης αντίσταση στην αλλαγή, οι παραδοσιακές μέθοδοι σύναψης συμβάσεων, τα έξοδα εκπαίδευσης, το υψηλό κόστος αγοράς λογισμικού, η έλλειψη ενημέρωσης σχετικά με το (BIM). Ο ερευνητής τόνισε τη σημασία της κυβερνητικής υποστήριξης για την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας.

Τέλος, ο Both (2012) από τη Γερμανία μελέτησε τις δυνατότητες και τα εμπόδια για την εφαρμογή του (BIM) στον κλάδο του AEC. Η αξιολόγηση έδειξε ότι τα μεγαλύτερα εμπόδια που αντιμετωπίζει το BIM ήταν τεχνολογικά, εκπαιδευτικά, οικονομικά και κανονιστικά εμπόδια. Οι εμφανείς διαφορές στην αξιολόγηση των εμποδίων BIM μεταξύ χρηστών BIM και μη χρηστών BIM δείχνουν την υψηλή αναγκαιότητα εκπαίδευσης και ενημέρωσης από ενώσεις και επιμελητήρια AEC.

3.3 Διεθνείς εμπειρικές μελέτες για την αποδοτικότητα του BIM

Η διεθνής εμπειρική βιβλιογραφία για το BIM αναδεικνύει τη συμβολή του BIM στην αποδοτικότητα των κατασκευαστικών έργων, καθώς η χρήση του συνδέεται με καλύτερη διαχείριση πληροφοριών, ενίσχυση της συνεργασίας, ακριβέστερο έλεγχο κόστους και βελτίωση της λήψης αποφάσεων. Οι σχετικές μελέτες εξετάζουν την αποδοτικότητα του BIM μέσα από διαφορετικές οπτικές, όπως η αντιλαμβανόμενη αξία του από τους επαγγελματίες του κλάδου, η μείωση σφαλμάτων, η βελτίωση του συντονισμού και η επιχειρησιακή αξία που δημιουργείται σε επίπεδο έργου.

Μία από τις πρώτες σημαντικές εμπειρικές μελέτες για την αξία του BIM πραγματοποιήθηκε από τους Becerik Gerber και Rice (2010) στον κατασκευαστικό κλάδο των Ηνωμένων Πολιτειών. Η έρευνα βασίστηκε σε διαδικτυακή έρευνα και είχε ως αντικείμενο την αντιλαμβανόμενη αξία του BIM από επαγγελματίες που δραστηριοποιούνται στον χώρο των κατασκευών. Η συμβολή της μελέτης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή προσεγγίζει το BIM ως εργαλείο που επηρεάζει την πρακτική αποδοτικότητα των έργων και όχι μόνο ως τεχνολογική καινοτομία. Οι συγγραφείς εξέτασαν ζητήματα που αφορούν τα απτά οφέλη της χρήσης του BIM, το κόστος εφαρμογής του, την οργανωτική του αξία και τη δυνατότητά του να βελτιώσει τη συνολική λειτουργία των έργων. Τα ευρήματα της μελέτης δείχνουν ότι το BIM γίνεται αντιληπτό ως μέσο που μπορεί να ενισχύσει τον συντονισμό, να βελτιώσει την ποιότητα της πληροφορίας και να υποστηρίξει πιο αποτελεσματικές αποφάσεις κατά τη διάρκεια του έργου. Παράλληλα, η μελέτη αναδεικνύει ότι η αποδοτικότητα του BIM εξαρτάται από τον βαθμό ενσωμάτωσής του στις διαδικασίες της επιχείρησης, από την εμπειρία των χρηστών και από την ικανότητα των οργανισμών να αξιοποιούν τη διαθέσιμη πληροφορία με συστηματικό τρόπο.

Στο ίδιο πλαίσιο, η μελέτη των Ku και Taiebat (2011) αποτελεί σημαντική εμπειρική συμβολή, καθώς διερεύνησε τις εμπειρίες και τις προσδοκίες κατασκευαστικών εταιρειών από τη χρήση του BIM. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε μέσω διαδικτυακού ερωτηματολογίου και επικεντρώθηκε σε κατασκευαστικές επιχειρήσεις των Ηνωμένων Πολιτειών, εξετάζοντας το επίπεδο εξοικείωσης με το BIM, τις στρατηγικές εφαρμογής του, τις οργανωτικές προσαρμογές που απαιτούνται

και τις νέες δεξιότητες που αναμένονται από τους επαγγελματίες του κλάδου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το BIM αναδεικνύεται σε σημαντικό στοιχείο των κατασκευαστικών λειτουργιών, καθώς οι επιχειρήσεις το αντιλαμβάνονται ως εργαλείο που μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους, στη συντόμευση του χρόνου υλοποίησης, στη βελτίωση της ποιότητας και στην ενίσχυση της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας. Ιδιαίτερη σημασία έχει το εύρημα ότι η εμπειρία με το BIM μεταβάλλει και τις προσδοκίες των εταιρειών από τους νέους αποφοίτους, καθώς οι επιχειρήσεις αναζητούν πλέον στελέχη με βασικές γνώσεις ψηφιακής μοντελοποίησης, κατανόηση εργαλείων BIM και ικανότητα συμμετοχής σε συνεργατικές διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής. Επομένως, η μελέτη δείχνει ότι η αποδοτικότητα του BIM εξαρτάται όχι μόνο από το ίδιο το λογισμικό, αλλά και από την οργανωτική ετοιμότητα, την εκπαίδευση, την εμπειρία των χρηστών και τη στρατηγική ένταξή του στις κατασκευαστικές πρακτικές.

Επιπρόσθετα, η μελέτη των Barlish και Sullivan (2012) αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές εμπειρικές προσεγγίσεις για τη μέτρηση των οφελών του BIM. Οι συγγραφείς πρότειναν ένα αναλυτικό πλαίσιο αξιολόγησης, το οποίο εφαρμόστηκε μέσα από μελέτες περίπτωσης σε βιομηχανικό περιβάλλον. Ειδικότερα, η έρευνα συνέκρινε έργα στα οποία χρησιμοποιήθηκε BIM με έργα που υλοποιήθηκαν μέσω συμβατικών πρακτικών, δίνοντας έμφαση στη σχέση ανάμεσα στην επένδυση για την εφαρμογή του BIM και στα οφέλη που προέκυψαν κατά την εκτέλεση των έργων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το BIM μπορεί να αποδώσει σημαντική αξία όταν η αξιολόγησή του βασίζεται σε συγκεκριμένους δείκτες και όχι μόνο σε γενικές εκτιμήσεις των χρηστών. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στα αιτήματα πληροφόρησης, στις εντολές αλλαγής, στη βελτίωση της διάρκειας του έργου, καθώς και στο κόστος σχεδιασμού και κατασκευής. Μέσα από αυτή την προσέγγιση, οι Barlish και Sullivan (2012) ανέδειξαν ότι η αποδοτικότητα του BIM μπορεί να τεκμηριωθεί με πρακτικούς και ποσοτικοποιήσιμους όρους, καθώς η χρήση του συνδέεται με καλύτερο έλεγχο του έργου, περιορισμό αστοχιών και πληρέστερη κατανόηση των επιπτώσεων κάθε τεχνικής απόφασης.

Ακόμη, η μελέτη των Bryde, Broquetas και Volm (2013) αποτελεί μία από τις πιο συστηματικές εμπειρικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση των οφελών του BIM σε επίπεδο έργου. Οι συγγραφείς ανέλυσαν 35 τεκμηριωμένες περιπτώσεις εφαρμογής BIM και εξέτασαν τον τρόπο με τον οποίο η χρήση του επηρέασε

βασικούς δείκτες απόδοσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το BIM συνδέεται κυρίως με βελτίωση στην οικονομική διαχείριση, στον χρονικό προγραμματισμό, στην ποιότητα των παραδοτέων και στην επικοινωνία μεταξύ των συμμετεχόντων. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι θετική επίδραση στο κόστος εμφανίστηκε στο 60% των περιπτώσεων, στοιχείο που δείχνει ότι το BIM μπορεί να συμβάλει στον καλύτερο έλεγχο των δαπανών και στη μείωση οικονομικών αποκλίσεων. Παράλληλα, θετική επίδραση στον χρόνο καταγράφηκε στο 34% των περιπτώσεων, γεγονός που συνδέει τη χρήση του BIM με καλύτερο προγραμματισμό, ταχύτερη επίλυση προβλημάτων και αποτελεσματικότερη ροή πληροφοριών. Η μελέτη ανέδειξε επίσης ότι τα οφέλη του BIM είναι πιο εμφανή όταν η τεχνολογία εντάσσεται σε συνεργατικές διαδικασίες και υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων από τα πρώτα στάδια του έργου.

Ένα ακόμη σημαντικό σημείο αποτελεί η οικονομική αποδοτικότητα του BIM. Η μελέτη των Giel και Issa (2013) εξέτασε την απόδοση επένδυσης του BIM σε κατασκευαστικά έργα, εστιάζοντας στη σχέση ανάμεσα στο κόστος εφαρμογής και στα οφέλη που προκύπτουν κατά την εκτέλεση του έργου. Η έρευνα βασίστηκε σε μελέτες περίπτωσης και ανέλυσε δείκτες που συνδέονται άμεσα με την οικονομική αποδοτικότητα, όπως η μείωση των αιτημάτων πληροφόρησης, η βελτίωση του συντονισμού, η αποφυγή συγκρούσεων και η αποτελεσματικότερη διαχείριση των αλλαγών. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς η απόδοση επένδυσης κυμάνθηκε από 16% έως 1.654%, γεγονός που δείχνει ότι το BIM μπορεί να δημιουργήσει ουσιαστική οικονομική αξία όταν εφαρμόζεται με οργανωμένο τρόπο. Η μεγάλη διακύμανση της απόδοσης φανερώνει ότι τα οφέλη εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του έργου, τον βαθμό ενσωμάτωσης του BIM, την εμπειρία της ομάδας και την ποιότητα των διαδικασιών συνεργασίας. Παράλληλα, η μείωση των αιτημάτων πληροφόρησης αναδεικνύει τη συμβολή του BIM στη βελτίωση της επικοινωνίας και στη μείωση των ασαφειών κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή. Η μελέτη τεκμηριώνει ότι η οικονομική αξία του BIM προκύπτει κυρίως από την έγκαιρη αναγνώριση προβλημάτων, τον καλύτερο έλεγχο των πληροφοριών και τον περιορισμό καθυστερήσεων ή πρόσθετων εργασιών.

Ακόμη, η μελέτη των Lu, Fung, Peng, Liang και Rowlinson (2014) αξιοποίησε δεδομένα από δύο έργα δημόσιας κατοικίας στο Χονγκ Κονγκ, από τα οποία στο ένα εφαρμόστηκε BIM και στο άλλο συμβατικές διαδικασίες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση του BIM συνδέθηκε με αυξημένη προσπάθεια στο

στάδιο του σχεδιασμού, επειδή απαιτήθηκε περισσότερη προεργασία για τη δημιουργία, τον έλεγχο και τον συντονισμό του ψηφιακού μοντέλου. Ωστόσο, αυτή η αρχική αύξηση της προσπάθειας οδήγησε σε σημαντικότερα οφέλη κατά το στάδιο της κατασκευής, όπου καταγράφηκε μείωση του κόστους και καλύτερη οργάνωση των εργασιών. Ιδιαίτερη αξία έχει το εύρημα ότι η συνολική εξοικονόμηση εκτιμήθηκε περίπου στο 6,92%, στοιχείο που δείχνει ότι το BIM μπορεί να δημιουργήσει ουσιαστικό οικονομικό όφελος όταν εφαρμόζεται συστηματικά. Η μελέτη αναδεικνύει επίσης ότι η αποδοτικότητα του BIM προκύπτει από τη μετατόπιση της προσπάθειας προς τα πρώτα στάδια του έργου, όπου οι αποφάσεις μπορούν να ληφθούν με καλύτερη πληροφόρηση και οι τεχνικές ασυμβατότητες μπορούν να εντοπιστούν πριν επηρεάσουν την κατασκευή.

Στο ίδιο πλαίσιο, η μελέτη των Li et al (2014) αποτελεί σημαντική εμπειρική συμβολή, καθώς επιχειρεί να ποσοτικοποιήσει τα οφέλη του BIM μέσα από εφαρμογή σε επίπεδο έργου. Οι συγγραφείς εξέτασαν τη χρήση του BIM σε διαφορετικές λειτουργίες της κατασκευαστικής διαδικασίας και ανέδειξαν ότι η τεχνολογία μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά τον τρόπο οργάνωσης και ελέγχου του έργου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το BIM συμβάλλει στον αποτελεσματικότερο σχεδιαστικό έλεγχο, καθώς διευκολύνει τον εντοπισμό προβλημάτων, τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων και την καλύτερη κατανόηση των τεχνικών απαιτήσεων. Παράλληλα, η προσομοίωση της κατασκευής ενίσχυσε τη δυνατότητα παρακολούθησης της αλληλουχίας των εργασιών και υποστήριξε πιο ακριβή προγραμματισμό. Η μελέτη ανέδειξε επίσης τη σημασία του BIM στη διαχείριση υλικών, καθώς η ψηφιακή μοντελοποίηση επιτρέπει καλύτερη εκτίμηση ποσοτήτων, ακριβέστερη οργάνωση πόρων και αποτελεσματικότερο έλεγχο προμηθειών. Σε οικονομικό επίπεδο, το BIM συνδέθηκε με βελτιωμένο έλεγχο κόστους, επειδή οι πληροφορίες του μοντέλου μπορούν να αξιοποιηθούν για συστηματικότερη παρακολούθηση των δαπανών και για πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις κατά την εξέλιξη του έργου. Συνεπώς, η έρευνα των Li et al. (2014) τεκμηριώνει ότι η αποδοτικότητα του BIM εκφράζεται μέσα από καλύτερη διαχείριση πόρων, ακριβέστερο έλεγχο κόστους και αποτελεσματικότερη παρακολούθηση της προόδου των κατασκευαστικών εργασιών.

Αντίστοιχα, η μελέτη των Cao et al (2015) προσφέρει σημαντική εμπειρική τεκμηρίωση, καθώς βασίστηκε σε 106 κατασκευαστικά έργα στην Κίνα και εξέτασε

τις πρακτικές εφαρμογής και την αποτελεσματικότητα του BIM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση του BIM συνδέεται με θετική επίδραση στη λειτουργική αποτελεσματικότητα των εργασιών, κυρίως μέσα από τη βελτίωση του συντονισμού, την καλύτερη διαχείριση της πληροφορίας και την ακριβέστερη παρακολούθηση των διαδικασιών του έργου. Η μελέτη ανέδειξε επίσης ότι τα οφέλη του BIM αυξάνονται όταν η εφαρμογή του καλύπτει περισσότερες φάσεις και λειτουργίες του έργου, στοιχείο που δείχνει τη σημασία της ολοκληρωμένης χρήσης του. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην υποστήριξη του πελάτη, η οποία αναδείχθηκε ως κρίσιμος παράγοντας επιτυχίας, επειδή διευκολύνει τη θεσμική αποδοχή, την παροχή πόρων και τη συστηματική ένταξη του BIM στις διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής.

Όσον αφορά την παραγωγικότητα εργασίας, η μελέτη των Poirier, Staub French και Forgues (2015) εξέτασε την επίδραση του BIM στην παραγωγικότητα της εργασίας μέσα από έρευνα δράσης σε μικρή εξειδικευμένη επιχείρηση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το BIM μπορεί να ενισχύσει την αποδοτικότητα των συνεργειών όταν εντάσσεται σε οργανωμένες πρακτικές προετοιμασίας, συντονισμού και προκατασκευής. Η χρήση ψηφιακών μοντέλων υποστήριξε καλύτερη κατανόηση των εργασιών, σαφέστερη οργάνωση των πληροφοριών και αποτελεσματικότερη σύνδεση ανάμεσα στο γραφείο, στο εργοτάξιο και στην παραγωγή. Η μελέτη ανέδειξε επίσης ότι η παραγωγικότητα επηρεάζεται από τον τρόπο εφαρμογής του BIM, την εμπειρία των εργαζομένων, την προσαρμογή των διαδικασιών και την ικανότητα της επιχείρησης να μετατρέψει το ψηφιακό μοντέλο σε πρακτικό εργαλείο εργασίας.

Στο ίδιο πλαίσιο, η μελέτη των Cao, Li και Wang (2017) ανέπτυξε και έλεγξε εμπειρικά ένα μοντέλο για την επίδραση της εφαρμογής του BIM στην απόδοση σχεδιασμού και κατασκευής στην Κίνα. Η έρευνα βασίστηκε στη θεωρία εξάρτησης από πόρους (Resource Dependence Theory), η οποία εξετάζει πώς οι οργανισμοί εξαρτώνται από εξωτερικούς πόρους, πληροφορίες και συνεργασίες για να επιτύχουν καλύτερα αποτελέσματα. Τα δεδομένα προήλθαν από μελετητές και γενικούς εργολάβους, γεγονός που επέτρεψε στους συγγραφείς να εξετάσουν την εφαρμογή του BIM από την πλευρά βασικών συμμετεχόντων στο έργο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το BIM συμβάλλει στην ενίσχυση της απόδοσης κυρίως μέσω της βελτίωσης της διαοργανωσιακής συνεργασίας. Ειδικότερα, η ανταλλαγή πληροφοριών, ο συντονισμός και η συνεργατική λήψη αποφάσεων λειτουργούν ως βασικοί μηχανισμοί μέσα από τους οποίους το BIM παράγει οφέλη αποδοτικότητας.

Η μελέτη ανέδειξε ότι η τεχνολογική εφαρμογή του BIM αποκτά μεγαλύτερη αξία όταν συνδέεται με οργανωτικές πρακτικές που υποστηρίζουν τη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκομένων.

Επιπρόσθετα, η μελέτη των Cao et al (2018) αξιοποίησε διαχρονικά δεδομένα από πρακτικές εφαρμογής BIM στη Σαγκάη για την περίοδο 2007 έως 2015 και εξέτασε τη σχέση ανάμεσα στη δομή των δικτύων συνεργασίας και στην οργανωτική ανταγωνιστικότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή του BIM συνδέεται με την ανάπτυξη πιο οργανωμένων δικτύων συνεργασίας, μέσα από τα οποία οι επιχειρήσεις μπορούν να αποκτούν πρόσβαση σε κρίσιμες πληροφορίες, τεχνική γνώση και συμπληρωματικούς πόρους. Η θέση μιας επιχείρησης μέσα στο δίκτυο συνεργασιών επηρεάζει την ικανότητά της να αξιοποιεί τις δυνατότητες του BIM και να ενισχύει την ανταγωνιστικότητά της. Οι επιχειρήσεις που συμμετέχουν ενεργά σε δίκτυα BIM αποκτούν καλύτερες δυνατότητες συντονισμού, αυξημένη οργανωτική μάθηση και μεγαλύτερη ικανότητα προσαρμογής στις απαιτήσεις σύνθετων έργων. Η μελέτη ανέδειξε επίσης ότι η αποδοτικότητα του BIM εξαρτάται από την ποιότητα των σχέσεων συνεργασίας, την ανταλλαγή τεχνογνωσίας και τη δυνατότητα των οργανισμών να ενσωματώνουν τη γνώση που παράγεται μέσα από κοινές ψηφιακές πρακτικές.

Επίσης, η μελέτη των Franz και Messner (2019) ανέλυσε δεδομένα από περισσότερα από 200 έργα και εξέτασε την επίδραση της υιοθέτησης του BIM και του BIM Execution Planning στην απόδοση έργου. Η έρευνα χρησιμοποίησε ποσοτική μεθοδολογία και αξιοποίησε πολλαπλή παλινδρόμηση, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο η αυξημένη χρήση του BIM συνδέεται με βελτιωμένους δείκτες κόστους, χρόνου και ποιότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η υιοθέτηση του BIM παρουσιάζει θετική σχέση με την ταχύτητα παράδοσης, την αντιλαμβανόμενη ποιότητα της εγκατάστασης και τη συνοχή της ομάδας έργου. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, επειδή δείχνει ότι η αποδοτικότητα του BIM δεν περιορίζεται στον τεχνικό σχεδιασμό, αλλά επεκτείνεται στη συνολική λειτουργία της ομάδας και στην ποιότητα της συνεργασίας. Παράλληλα, η μελέτη έδειξε ότι η συμμετοχή στο BIM Execution Planning δεν λειτούργησε ως παράγοντας που ενίσχυσε άμεσα τη σχέση ανάμεσα στο BIM και στην απόδοση έργου. Ωστόσο, αναδείχθηκε ως σημαντικός προβλεπτικός παράγοντας της ίδιας της υιοθέτησης του BIM, στοιχείο

που δείχνει ότι ο οργανωμένος σχεδιασμός εφαρμογής διευκολύνει την ουσιαστική χρήση της τεχνολογίας.

Ακόμη, η μελέτη των Datta, Sobuz, Mim και Nath (2023) αποτελεί πρόσφατη εμπειρική συμβολή από το Μπαγκλαντές και αξιολογεί την αποτελεσματικότητα της χρήσης εργαλείων BIM στη διαχείριση κατασκευαστικού έργου. Η έρευνα βασίστηκε σε μελέτη περίπτωσης και περιέλαβε την ανάπτυξη τρισδιάστατου μοντέλου, την ανίχνευση συγκρούσεων, τη δομική ανάλυση, τον 4D προγραμματισμό και την 5D εκτίμηση κόστους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το BIM βελτιώνει την απόδοση των διαδικασιών σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου, καθώς επιτρέπει πιο ακριβείς επιμετρήσεις ποσοτήτων, καλύτερη οργάνωση του χρονοδιαγράμματος και αποτελεσματικότερη παρακολούθηση του κόστους. Η ανίχνευση συγκρούσεων συνέβαλε στη μείωση τεχνικών σφαλμάτων και αβεβαιοτήτων πριν από την κατασκευαστική φάση, ενώ η σύνδεση του μοντέλου με χρονικά και οικονομικά δεδομένα ενίσχυσε τη δυνατότητα πρόβλεψης και ελέγχου. Ιδιαίτερη σημασία έχει ότι η μελέτη τεκμηριώνει την αξία του BIM σε ένα αναπτυσσόμενο κατασκευαστικό περιβάλλον, όπου η ανάγκη για καλύτερο συντονισμό, περιορισμό λαθών και μείωση δαπανών είναι ιδιαίτερα έντονη.

Τέλος, η μελέτη των Zhang et al (2018) εξέτασε τον τρόπο με τον οποίο το BIM μπορεί να συμβάλει στην εφαρμογή αρχών λιτής κατασκευής μέσω της βελτίωσης της αποδοτικότητας των ομάδων εργασίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η χρήση του BIM ενισχύει την καλύτερη κατανόηση του έργου από τα μέλη της ομάδας, διευκολύνει τον συντονισμό των δραστηριοτήτων και συμβάλλει στη μείωση μη παραγωγικών ενεργειών. Η σύνδεση του BIM με τις αρχές της λιτής κατασκευής αναδεικνύει ότι η αποδοτικότητα της τεχνολογίας εκφράζεται πέρα από τον έλεγχο κόστους και χρόνου, καθώς επηρεάζει και την ποιότητα της οργάνωσης της εργασίας. Η δυνατότητα οπτικής αναπαράστασης του έργου, η βελτιωμένη ροή πληροφοριών και η συνεργατική διαχείριση των διαδικασιών βοηθούν τις ομάδες να εργάζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη συνοχή.

Κεφάλαιο 4. Μελέτη περίπτωσης εφαρμογής BIM στο Φράγμα Βαλσαμιώτη

Το φράγμα Βαλσαμιώτη αποτελεί ένα από τα σημαντικά υδραυλικά έργα της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελέτη εφαρμογής τεχνολογιών BIM. Ειδικότερα, βρίσκεται στον νομό Χανίων, στο βορειοανατολικό άκρο του ρέματος Βαλσαμιώτη, σε απόσταση περίπου 900 μέτρων από τον οικισμό Βατόλακκος. Το έργο έχει αρδευτικό χαρακτήρα και σχεδιάστηκε για τη συγκέντρωση, αποθήκευση και αξιοποίηση υδατικών πόρων στην ευρύτερη περιοχή. Η τροφοδοσία του συνδέεται με τον χείμαρρο Βαλσαμιώτη, ενώ η λειτουργία του ταμιευτήρα εντάσσεται στη συνολικότερη ανάγκη ενίσχυσης της άρδευσης και ορθολογικής διαχείρισης νερού στη δυτική Κρήτη (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.; Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης Α.Ε., χ.χ.).

Από τεχνική άποψη, το φράγμα κατατάσσεται στα φράγματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα τύπου Lean RCC με ανάντη πλάκα σκυροδέματος. Ο τύπος αυτός διαφοροποιείται από τα συμβατικά φράγματα σκυροδέματος, καθώς στηρίζεται στη χρήση μίγματος κυλινδρούμενου σκυροδέματος με χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, το οποίο διαστρώνεται σε στρώσεις και συμπυκνώνεται μηχανικά. Στην περίπτωση του Βαλσαμιώτη, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο αναφέρεται σε 50 kg ανά κυβικό μέτρο, με χρήση CEM II 45, ενώ η χρήση ποζολάνης εμφανίζεται μηδενική. Η τεχνική αυτή επιλογή συνδέεται με την ανάγκη ταχείας κατασκευής, ελέγχου του κόστους και δημιουργίας ενός σταθερού σώματος φράγματος με ικανοποιητική φέρουσα συμπεριφορά. Η ανάντη πλάκα σκυροδέματος λειτουργεί ως βασικό στοιχείο στεγανότητας, ενώ η κατάντη διαμόρφωση με προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος συμβάλλει στη γεωμετρική οργάνωση και προστασία της παρειάς (RCCDAMS, 2018; Δερματάς, 2014).

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου αναδεικνύουν την κλίμακα και τη σύνθετη φύση του. Το ύψος του φράγματος αναφέρεται σε 66 m στις τεχνικές περιγραφές που το κατατάσσουν στα φράγματα Lean RCC, ενώ στην επίσημη τεχνική παρουσίαση του Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης δίνεται ύψος 67,20 m από το φυσικό έδαφος. Το μήκος της στέψης είναι 335 m και το πλάτος της στέψης 4,5 m, ενώ η στάθμη στέψης προσδιορίζεται στο +190,20. Ο όγκος του σώματος του φράγματος ανέρχεται σε 600.000 m³ και ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα

προσεγγίζει τα 6 εκατομμύρια m^3 . Η επιφάνεια ταμιευτήρα αναφέρεται σε 2.850 m^2 στα στοιχεία που παρατέθηκαν για την τεχνική ταξινόμηση του έργου. Τα μεγέθη αυτά καταδεικνύουν ότι πρόκειται για έργο σημαντικής υδραυλικής και κατασκευαστικής κλίμακας, στο οποίο η ακριβής γεωμετρική αποτύπωση αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη μελέτη, την κατασκευή και τη μελλοντική διαχείριση (RCCDAMS, 2018).

Η μορφολογία του φράγματος καθορίζεται από τις κλίσεις των παρειών και από τη διάταξη των επιμέρους λειτουργικών στοιχείων. Η ανάντη κλίση του φράγματος είναι 0,80 και μορφώνεται με πλάκα σκυροδέματος, η οποία λειτουργεί ως στεγανωτικό μέσο και ως προστατευτική επιφάνεια έναντι της επίδρασης του ταμιευμένου νερού. Η κατόντη κλίση είναι επίσης 0,80 και μορφώνεται με προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος. Αντίστοιχη κλίση 0,80 αναφέρεται και στην περιοχή του υπερχειλιστή. Η συμμετρική αυτή γεωμετρική λογική καθιστά το φράγμα κατάλληλο για παραμετρική μοντελοποίηση, επειδή οι παρειές, οι στρώσεις, οι ζώνες υλικών και τα προστατευτικά στοιχεία μπορούν να αποδοθούν ως διακριτά ψηφιακά αντικείμενα με συγκεκριμένη γεωμετρία, στάθμη, υλικό και κατασκευαστική αλληλουχία (Δερματάς, 2014; Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Το κύριο σώμα του φράγματος αποτελείται από στρώσεις σκληρού επιχώματος ή κυλινδρούμενου σκυροδέματος, οι οποίες συγκροτούν τον βασικό όγκο της κατασκευής. Στην εφαρμογή BIM που εξετάζεται, οι στρώσεις αυτές μοντελοποιήθηκαν με παραμετρικό τρόπο, ώστε να μπορούν να αποδοθούν η γεωμετρία, το μήκος, το πλάτος και η στάθμη κάθε επιμέρους τμήματος (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Πέρα από το κύριο σώμα, το φράγμα περιλαμβάνει σειρά συνοδών έργων που αναδεικνύουν την πολυπλοκότητα του τεχνικού αντικειμένου. Σε αυτά περιλαμβάνονται η αρχική επιφάνεια εδάφους, οι εκσκαφές θεμελίωσης, τα έργα εκτροπής, το πρόφραγμα, ο αγωγός εκτροπής, οι σήραγγες, οι στοές αποστράγγισης, η στοά τσιμεντενέσεων, η στοά εκκένωσης και η στοά υδροληψίας. Η παρουσία αυτών των στοιχείων δείχνει ότι η κατασκευή του φράγματος απαιτεί συντονισμό γεωτεχνικών, υδραυλικών και κατασκευαστικών εργασιών. Η θεμελίωση και οι εκσκαφές συνδέονται με την προσαρμογή του έργου στη μορφολογία του φυσικού εδάφους, ενώ τα έργα εκτροπής επιτρέπουν την ασφαλή διαχείριση της ροής κατά τη

διάρκεια της κατασκευής. Οι στοές και οι σήραγγες εξυπηρετούν λειτουργίες αποστράγγισης, υδροληψίας, εκκένωσης και ελέγχου, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα του έργου (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Το σύστημα υπερχειλίστης αποτελεί κρίσιμο μέρος του φράγματος, επειδή εξασφαλίζει την ασφαλή απομάκρυνση των πλεοναζόντων υδάτων. Περιλαμβάνει βαθμιδωτό μετωπικό υπερχειλιστή, σώμα υπερχειλιστή τύπου OGEE και λεκάνη ηρεμίας. Η βαθμιδωτή μορφή συμβάλλει στην απόσβεση της ενέργειας της ροής, ενώ η λεκάνη ηρεμίας προστατεύει την κατάντη περιοχή και περιορίζει τις υδραυλικές καταπονήσεις. Η περιοχή του υπερχειλιστή παρουσιάζει αυξημένες απαιτήσεις γεωμετρικής ακρίβειας, επειδή συνδέει τη λειτουργία του ταμιευτήρα με την ασφαλή εκτόνωση της παροχής (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Η υδροληψία και η εκκένωση του φράγματος εξυπηρετούνται από τον πύργο υδροληψίας, τη στοά υδροληψίας, το έργο εισόδου και εξόδου εκκένωσης και τη στοά εκκένωσης. Τα στοιχεία αυτά προσδίδουν στο φράγμα λειτουργική αυτοτέλεια, καθώς επιτρέπουν την ελεγχόμενη διαχείριση του αποθηκευμένου νερού. Παράλληλα, στη στέψη του έργου αναπτύσσονται επιμέρους στοιχεία λειτουργίας και ασφάλειας, όπως τοίχος αντιστήριξης, κράσπεδο, στρώση κυκλοφορίας, στηθαίο, κιγκλιδώματα και φωτισμός. Η ύπαρξη αυτών των κατασκευών δείχνει ότι το φράγμα σχεδιάζεται τόσο ως υδραυλικό έργο όσο και ως τεχνική εγκατάσταση που χρειάζεται πρόσβαση, επιθεώρηση, λειτουργική εποπτεία και μακροχρόνια συντήρηση (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

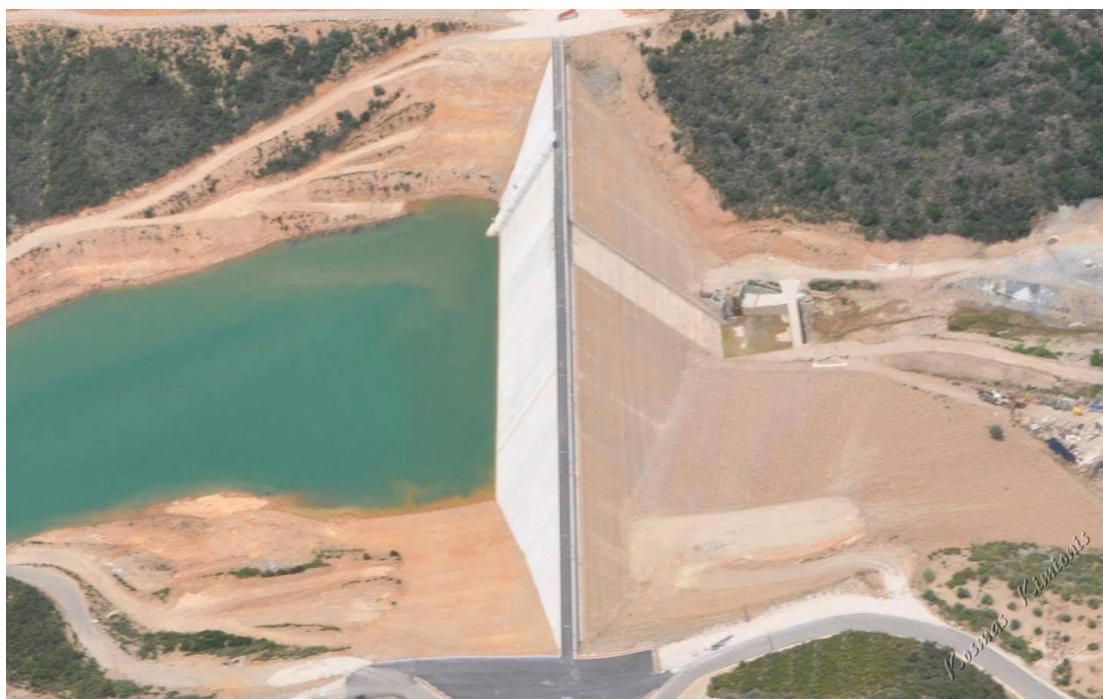
Η κυριότητα και η διαχείριση του έργου συνδέονται με τον Οργανισμό Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης, ο οποίος εντάσσεται σήμερα στη θεσμική συνέχεια του Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης. Η μελέτη του έργου αποδίδεται στην ΥΔΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ, ενώ η κατασκευή στην J&P AVAX. Το έτος περάτωσης αναφέρεται ως 2014 και η δαπάνη κατασκευής προσεγγίζει τα 40 εκατομμύρια ευρώ. Τα στοιχεία αυτά αναδεικνύουν τη διοικητική, μελετητική και οικονομική διάσταση του έργου. Πρόκειται για τεχνικό έργο υψηλού κόστους και πολλαπλών εμπλεκομένων, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο παράδειγμα για την ανάλυση της αξίας του BIM σε έργα όπου η γεωμετρική ακρίβεια, ο χρονικός συντονισμός, η διαχείριση ποσοτήτων και η συνεργασία μεταξύ φορέων έχουν

κεντρική σημασία (RCCDAMS, 2018; Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης Α.Ε., 2018; Δερματάς, 2014).

Η αξιοποίηση του ταμιευτήρα συνδέεται και με συνδετήριο αγωγό μεταφοράς νερού, ο οποίος ενώνει τον ταμιευτήρα με τον κύριο αγωγό Αγιάς, Μυλωνιανών και Μεσκλών. Ο αγωγός είναι χαλύβδινος, με διάμετρο από Φ700 έως Φ1000 και συνολικό μήκος 3.520 m. Μέσω του αγωγού αυτού, ο ταμιευτήρας τροφοδοτείται με νερό από τις πηγές των Μεσκλών και εξυπηρετεί αρδευτικά δίκτυα με νερό από τον ίδιο τον ταμιευτήρα και από τις πηγές. Η λειτουργία αυτή ενισχύει τη σημασία του φράγματος ως τμήματος ενός ευρύτερου υδραυλικού συστήματος και όχι ως μεμονωμένης κατασκευής (Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης Α.Ε., χ.χ.).



Εικόνα 1. Το φράγμα Βαλσαμιώτη στα Χανια (Πηγή: <https://www.ertnews.gr/perifereiakoi-stathmoi/chania/techniki-syskepsi-ston-o-a-k-gia-to-fragma-valsamioti/>)



Εικόνα 2. Άποψη του φράγματος Βαλσαμιώτη στα Χανιά (Πηγή: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=949048768525731&set=pcb.949049481858993>).



Εικόνα 3. Περιοχή φράγματος Βαλσαμιώτη (RCCDAMS, 2018).

Μετά την τεχνική περιγραφή του φράγματος Βαλσαμιώτη, το case study επικεντρώνεται στη μεθοδολογία εφαρμογής του BIM στο συγκεκριμένο έργο. Η εφαρμογή είχε διερευνητικό χαρακτήρα, καθώς στόχος ήταν να εξεταστεί κατά πόσο

ένα σύνθετο έργο υποδομής, όπως ένα φράγμα από σκληρό επίχωμα, μπορεί να ωφεληθεί από τη χρήση BIM. Η μεθοδολογία κάλυψε τρεις βασικές διαστάσεις του BIM, δηλαδή το 3D μοντέλο, το 4D χρονοδιάγραμμα και την 5D προμέτρηση, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα εφαρμογής του BIM σε φράγματα και συναφή υδραυλικά έργα (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Αρχικά τα παραδοτέα σχέδια της μελέτης, μετατράπηκαν σε τρισδιάστατα αντικείμενα στο περιβάλλον Autodesk Revit, το οποίο υποστηρίζει τεχνολογία BIM και επιτρέπει τη δημιουργία αντικειμένων με γεωμετρικά και πληροφοριακά χαρακτηριστικά. Η επιλογή του Revit είχε πρακτική σημασία, επειδή το λογισμικό παρέχει δυνατότητες παραμετρικής μοντελοποίησης και οργάνωσης αντικειμένων σε ένα ενιαίο πληροφοριακό περιβάλλον (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Για το επίπεδο ανάπτυξης του μοντέλου επιλέχθηκε το Level of Development 200. Στο LOD 200, τα στοιχεία του έργου αποκτούν επαρκή μορφή ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οπτικοποίηση, χρονικό προγραμματισμό και ενδεικτική προμέτρηση (BIMForum, 2013). Το συνολικό φράγμα χωρίστηκε σε επιμέρους κατασκευαστικά αντικείμενα, τα οποία αντιστοιχούν σε πραγματικές ενότητες του έργου. Η αρχική επιφάνεια εδάφους, οι εκσκαφές θεμελίωσης, τα έργα εκτροπής, οι σήραγγες και στοές, το σώμα από στρώσεις σκληρού επιχώματος, ο υπερχειλιστής, η λεκάνη ηρεμίας, ο πύργος υδροληψίας, ο μανδύας στεγανότητας και τα έργα στέψης αποδόθηκαν ως διακριτά αντικείμενα μέσα στο μοντέλο (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Τα αντικείμενα μοντελοποιήθηκαν αρχικά εκτός του περιβάλλοντος του κύριου έργου και στη συνέχεια εισήχθησαν στο συνολικό μοντέλο. Για στοιχεία με επαναλαμβανόμενη ή παρεμφερή γεωμετρία δημιουργήθηκαν παραμετρικές οικογένειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι στρώσεις σκληρού επιχώματος, οι οποίες αποδόθηκαν ως πλάκες πάχους 90 cm, με κάθε τέτοια μονάδα να αντιστοιχεί σε τρεις στρώσεις σκληρού επιχώματος των 30 cm. Η γεωμετρία τους, όπως το μήκος, το πλάτος και η στάθμη, εξαρτήθηκε από παραμέτρους που μπορούσε να ορίσει ο χρήστης κατά την τοποθέτηση στο μοντέλο. Η ίδια λογική εφαρμόστηκε και σε άλλα στοιχεία, όπως ο μανδύας στεγανότητας, ο τοίχος αντιστήριξης, το κράσπεδο και το στηθαίο της στέψης. Η παραμετρική αυτή προσέγγιση ενίσχυσε την

ευελιξία του μοντέλου και διευκόλυνε την αναπαράσταση επαναλαμβανόμενων κατασκευαστικών στοιχείων (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Η μεθοδολογία περιέλαβε επίσης τη χρήση του Autodesk Civil 3D για αντικείμενα που συνδέονται περισσότερο με την τοπογραφία και τη γεωμετρία του εδάφους. Η αρχική επιφάνεια εδάφους μοντελοποιήθηκε στο Civil 3D, επειδή το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει εξειδικευμένα εργαλεία για τοπογραφικά αντικείμενα και επιφάνειες με υψομετρική πολυπλοκότητα. Στη συνέχεια, η επιφάνεια εισήχθη στο Autodesk Revit και ενσωματώθηκε στο συνολικό πληροφοριακό μοντέλο. Αντίστοιχα, τμήμα της οδοποιίας μοντελοποιήθηκε στο Civil 3D λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας του. Η διαδικασία αυτή ανέδειξε τη σημασία της διαλειτουργικότητας ανάμεσα σε διαφορετικά εργαλεία BIM, ιδίως σε έργα υποδομής όπου συνυπάρχουν γεωτεχνικά, τοπογραφικά, υδραυλικά και δομικά στοιχεία (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Μετά την ολοκλήρωση του τρισδιάστατου μοντέλου, η μεθοδολογία προχώρησε στον 4D χρονοπρογραμματισμό. Στο BIM 4D, ο χρόνος αποτελεί την τέταρτη διάσταση πληροφορίας και συνδέεται με τα αντικείμενα του μοντέλου. Αρχικά δημιουργήθηκε η Δομή Ανάλυσης Εργασιών (Work Breakdown Structure), στην οποία οι εργασίες κατασκευής οργάνωθηκαν σε δραστηριότητες και υποδραστηριότητες. Η δομή αυτή αναπτύχθηκε με προσανατολισμό το πληροφοριακό μοντέλο και τη διευκόλυνση της ψηφιοποίησης, αντί να ακολουθεί πλήρως τη μορφή του συμβατικού χρονοδιαγράμματος ή τη δομή του προϋπολογισμού. Στη συνέχεια καταρτίστηκε το χρονοδιάγραμμα εργασιών στο Microsoft Project (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Η σύνδεση του χρονοδιαγράμματος με το τρισδιάστατο μοντέλο πραγματοποιήθηκε στο Autodesk Navisworks. Το μοντέλο εισήχθη στο Navisworks και το αρχείο του Microsoft Project συνδέθηκε δυναμικά με αυτό. Μέσω του εργαλείου TimeLiner, κάθε δραστηριότητα του χρονοδιαγράμματος αντιστοιχίστηκε σε ένα ή περισσότερα αντικείμενα του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε η προσομοίωση της κατασκευής, η οποία επέτρεψε την παρακολούθηση της εικονικής εξέλιξης του έργου σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα. Η 4D προσομοίωση παρείχε στον μηχανικό τη δυνατότητα να εξετάζει διαφορετικά στάδια της κατασκευής, να συγκρίνει την προγραμματισμένη πορεία με την πραγματική εξέλιξη και να αξιολογεί

την ανάγκη αλλαγών στην αλληλουχία των δραστηριοτήτων (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας αφορούσε την 5D προμέτρηση, δηλαδή τη σύνδεση του μοντέλου με πληροφορίες ποσοτήτων και δυνητικά κόστους. Στην εφαρμογή του φράγματος Βαλσαμιώτη έγινε εξαγωγή πληροφορίας που αφορούσε ποσότητες και ορισμένα υλικά από το πληροφοριακό μοντέλο του έργου. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Navisworks με χρήση του εργαλείου Quantification. Αρχικά δημιουργήθηκε το Item Catalog μέσω ειδικής φόρμας Excel Catalog Template Tool, ώστε να οργανωθούν τα αντικείμενα και οι εργασίες που θα συμμετείχαν στην προμέτρηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε απλοποιημένη μορφή του καταλόγου αντικειμένων που είχε δημιουργηθεί για τον χρονικό προγραμματισμό, δηλαδή του WBS, καθώς και κατάλογος υλικών και εργασιών στη λογική των ομάδων του προϋπολογισμού της μελέτης. Ο κατάλογος αυτός εισήχθη στο πεδίο Resource και περιέλαβε τα βασικά υλικά που συνδέονται με σημαντικό μέρος του κόστους του έργου (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

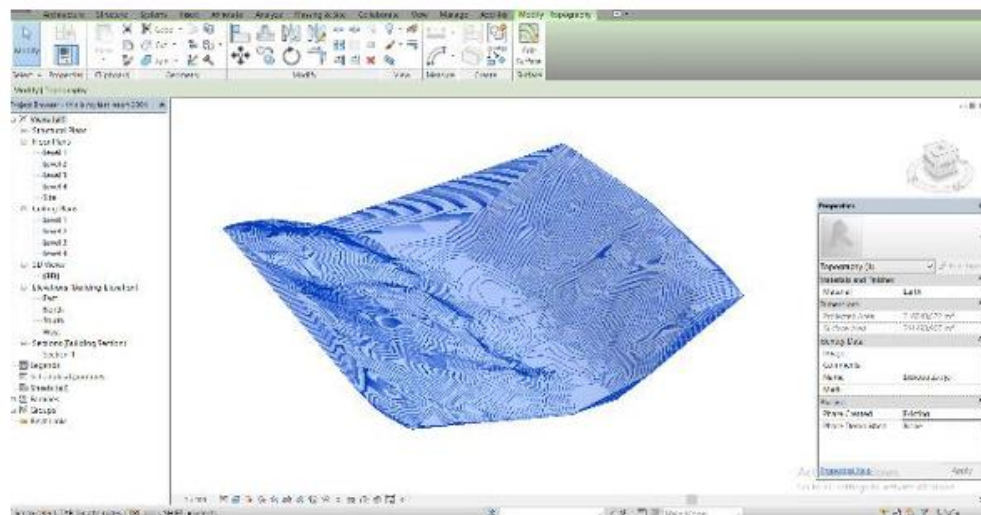
Στη συνέχεια οργανώθηκε το Quantification Workbook, όπου τα αντικείμενα του μοντέλου αντιστοιχίστηκαν με τα αντικείμενα ή τις εργασίες του Item Catalog και με τα υλικά, τις υπηρεσίες ή τις εργασίες του Resource Catalog. Με τον τρόπο αυτό συγκεντρώθηκε και δομήθηκε η πληροφορία που απαιτείται για την προμέτρηση. Η 5D εφαρμογή ανέδειξε επομένως τη δυνατότητα του BIM να υποστηρίζει την εξαγωγή ποσοτήτων και να λειτουργήσει ως βάση για μελλοντική κοστολόγηση, προϋπολογισμό και οικονομικό έλεγχο του έργου (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Αναλυτικότερα, η εφαρμογή του 3D BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη αποτέλεσε το βασικό στάδιο πάνω στο οποίο στηρίχθηκαν οι επόμενες διαστάσεις του πληροφοριακού μοντέλου, δηλαδή ο 4D χρονοπρογραμματισμός και η 5D προμέτρηση. Η δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου επέτρεψε τη συγκρότηση μιας συνολικής ψηφιακής αναπαράστασης του έργου, η οποία αποδίδει όχι μόνο τη μορφή του φράγματος, αλλά και τη σχέση των επιμέρους τεχνικών αντικειμένων μέσα στον χώρο.

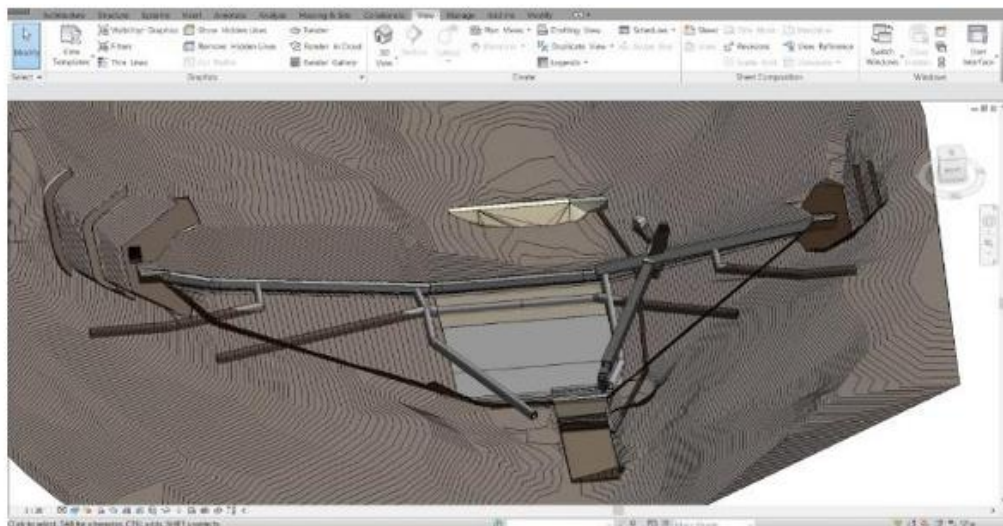
Όπως προαναφέρθηκε η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε κυρίως σε περιβάλλον Autodesk Revit, το οποίο επιλέχθηκε επειδή υποστηρίζει την ανάπτυξη πληροφοριακών μοντέλων με παραμετρικά αντικείμενα. Το Revit λειτούργησε ως

βασικό εργαλείο συγκρότησης του μοντέλου, καθώς επέτρεψε την απόδοση των κύριων κατασκευαστικών στοιχείων σε μορφή ψηφιακών αντικειμένων με συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Έτσι, το 3D BIM λειτούργησε ως βάση κατανόησης της μορφολογίας, της κατασκευαστικής δομής και της λειτουργικής διάρθρωσης του φράγματος.

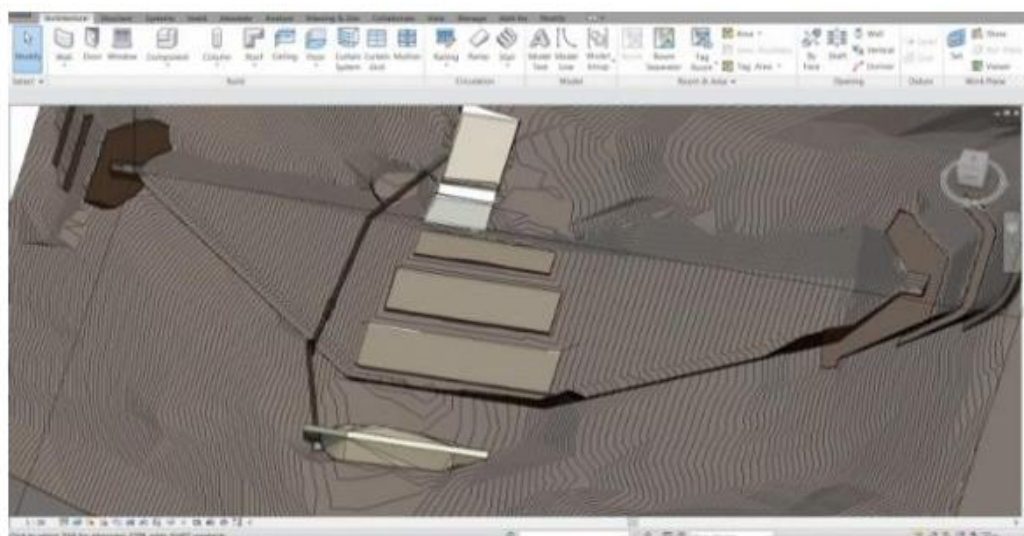
Οι εικόνες του αρχείου αναδεικνύουν τη σημασία της τρισδιάστατης απεικόνισης για την κατανόηση του έργου. Η εικόνα 4 αποτυπώνει την αρχική επιφάνεια εδάφους, στοιχείο κρίσιμο για ένα φράγμα επειδή η γεωμετρία του φυσικού υποβάθρου καθορίζει τη θεμελίωση, τις εκσκαφές και την προσαρμογή του σώματος στο τοπίο. Οι εικόνες 5 και 6 παρουσιάζουν τις εκσκαφές θεμελίωσης, τα έργα εκτροπής, τις σήραγγες και τις στοές, αναδεικνύοντας τη χωρική πολυπλοκότητα των υπόγειων και γραμμικών έργων. Τέλος η εικόνα 7 παρουσιάζει τον βαθμιδωτό μετωπικό υπερχειλιστή και τη λεκάνη ηρεμίας, στοιχεία που είναι κρίσιμα για την ασφαλή λειτουργία του φράγματος.



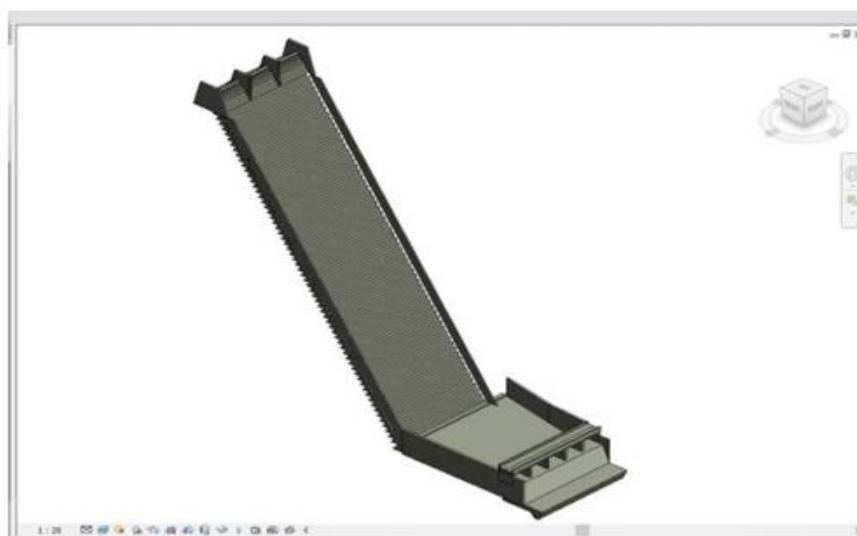
Εικόνα 4.Αρχική επιφάνεια εδάφους (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).



Εικόνα 5.Εκσκαφές θεμελίωσης και έργα εκτροπής (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).



Εικόνα 6. Σήραγγες και στοές αποστράγγισης, στοά τιμεντενέσεων, στοά εκκένωσης και υδροληψίας (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).



Εικόνα 7. Βαθμιδωτός Μετωπικός υπερχειλιστής και λεκάνη ηρεμίας (Νασίκα, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.).

Ιδιαίτερη μεθοδολογική σημασία έχει ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκαν τα αντικείμενα του μοντέλου. Τα αντικείμενα μοντελοποιήθηκαν ως Generic Model Families, δηλαδή οικογένειες γενικευμένων μοντέλων, και στη συνέχεια εισήχθησαν στο κύριο περιβάλλον του έργου. Για τα στοιχεία με επαναλαμβανόμενη ή παρόμοια γεωμετρία δημιουργήθηκαν παραμετρικές οικογένειες, ώστε η μορφή τους να μπορεί να προσαρμόζεται με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι στρώσεις σκληρού επιχώματος, οι οποίες μοντελοποιήθηκαν ως πλάκες πάχους 90 cm. Κάθε τέτοια πλάκα αντιστοιχεί σε τρεις στρώσεις σκληρού επιχώματος των 30 cm. Οι διαστάσεις τους, όπως το μήκος, το πλάτος και η στάθμη, εξαρτήθηκαν από παραμέτρους που ορίζονται κατά την τοποθέτηση στο μοντέλο. Η ίδια λογική εφαρμόστηκε και στον μανδύα στεγανότητας, στον τοίχο αντιστήριξης, στο κράσπεδο και στο στήθαίο της στέψης. Η παραμετρική μοντελοποίηση ενίσχυσε την ευελιξία του μοντέλου και επέτρεψε την αποδοτικότερη αναπαράσταση επαναλαμβανόμενων κατασκευαστικών στοιχείων.

Η ανάλυση της 3D εφαρμογής δείχνει ότι το βασικό όφελος του μοντέλου ήταν η ενιαία οπτικοποίηση και ο χωρικός συντονισμός του φράγματος και των συνοδών έργων. Το μοντέλο παρείχε τη δυνατότητα συνολικής κατανόησης της γεωμετρίας και της διάταξης των κατασκευαστικών στοιχείων, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο

σε φράγματα όπου η σχέση ανάμεσα στο σώμα, στο φυσικό έδαφος, στις στοές, στον υπερχειλιστή και στις κατασκευές υδροληψίας είναι καθοριστική. Παράλληλα, η τρισδιάστατη αναπαράσταση διευκολύνει την τεχνική επικοινωνία, επειδή επιτρέπει στους εμπλεκόμενους να αντιλαμβάνονται το έργο μέσα από ένα κοινό ψηφιακό περιβάλλον. Στην πράξη, η αξία του 3D BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη συνδέεται με την καλύτερη κατανόηση της κατασκευαστικής δομής, την προετοιμασία για χρονική προσομοίωση και την οργάνωση των δεδομένων που απαιτούνται για μελλοντική εξαγωγή ποσοτήτων.

Συνολικά, η εφαρμογή 3D BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη ανέδειξε ότι τα έργα φραγμάτων μπορούν να αποδοθούν αποτελεσματικά ως πληροφοριακά μοντέλα, όταν προηγείται ορθός διαχωρισμός των κατασκευαστικών στοιχείων και κατάλληλη επιλογή επιπέδου ανάπτυξης. Το LOD 200 παρείχε επαρκή βάση για τη διερεύνηση της γεωμετρίας, των αντικειμένων και των βασικών ποσοτικών σχέσεων του έργου. Το Revit υποστήριξε την κύρια δομή του μοντέλου, το Civil 3D κάλυψε τις απαιτήσεις τοπογραφικής ακρίβειας και οι παραμετρικές οικογένειες διευκόλυναν την αναπαράσταση επαναλαμβανόμενων στοιχείων. Η εφαρμογή δείχνει ότι το 3D BIM αποτελεί το θεμέλιο της ψηφιακής διαχείρισης του φράγματος, επειδή οργανώνει την τεχνική πληροφορία σε ενιαίο μοντέλο και δημιουργεί τις προϋποθέσεις για 4D χρονοπρογραμματισμό, 5D προμέτρηση και πληρέστερη διαχείριση του κύκλου ζωής του έργου.

Όσον αφορά την ανάπτυξη του τρισδιάστατου πληροφοριακού μοντέλου, η εφαρμογή BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη προχώρησε στη σύνδεση της γεωμετρικής πληροφορίας με τον χρόνο κατασκευής. Η σημασία της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι ιδιαίτερα μεγάλη για ένα έργο φράγματος, επειδή η κατασκευή του περιλαμβάνει πολλές διαδοχικές και παράλληλες δραστηριότητες, όπως εκσκαφές, έργα εκτροπής, κατασκευή στοών, διαμόρφωση σώματος, υδραυλικά έργα, υπερχειλιστή και έργα στέψης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η απλή παράθεση ενός συμβατικού χρονοδιαγράμματος παρέχει περιορισμένη εικόνα της πραγματικής εξέλιξης του έργου. Αντίθετα, η σύνδεση του χρονοδιαγράμματος με το τρισδιάστατο μοντέλο επιτρέπει την οπτική παρακολούθηση της κατασκευής στον χρόνο και ενισχύει την κατανόηση της κατασκευαστικής αλληλουχίας.

Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη της 4D εφαρμογής ήταν η δημιουργία της Δομής Ανάλυσης Εργασιών, γνωστής ως Work Breakdown Structure. Η δομή αυτή αποτελεί κατάλογο των εργασιών που απαιτούνται για την κατασκευή του έργου, οργανωμένων σε δραστηριότητες και υποδραστηριότητες. Στην περίπτωση του φράγματος Βαλσαμιώτη, η Δομή Ανάλυσης Εργασιών δεν ακολούθησε πλήρως τη συμβατική μορφή του χρονοδιαγράμματος ούτε τη δομή κοστολόγησης του προϋπολογισμού. Αντίθετα, αναπτύχθηκε με βάση τη λογική του πληροφοριακού μοντέλου, ώστε να διευκολύνεται η αντιστοίχιση των δραστηριοτήτων με τα επιμέρους αντικείμενα BIM.

Στη συνέχεια καταρτίστηκε το χρονοδιάγραμμα εργασιών του έργου. Για τη σύνταξη του αξιοποιήθηκαν διαθέσιμα στοιχεία από τη μελέτη και τις φάσεις κατασκευής του φράγματος Βαλσαμιώτη, ενώ όπου τα στοιχεία δεν επαρκούσαν έγιναν εύλογες παραδοχές. Η χρήση του Microsoft Project επέτρεψε τη δημιουργία ενός δομημένου χρονικού πλάνου, το οποίο στη συνέχεια μπορούσε να συνδεθεί με το τρισδιάστατο μοντέλο. Το κρίσιμο σημείο εδώ είναι ότι η 4D εφαρμογή δεν περιορίστηκε στη σύνταξη ενός ανεξάρτητου χρονοδιαγράμματος, αλλά στόχευσε στη δυναμική σύνδεσή του με τα αντικείμενα του μοντέλου, ώστε κάθε φάση της κατασκευής να αποκτήσει χωρική και χρονική υπόσταση. Η αντιστοίχιση των σταδίων με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε προβάλεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.1 Αντιστοιχία σταδίου BIM με το λογισμικό και του Φράγματος Βαλσαμιώτη

Στάδιο BIM	Λογισμικό	Εφαρμογή στο Φράγμα Βαλσαμιώτη
3D BIM	Autodesk Revit	Δημιουργία τρισδιάστατου πληροφοριακού μοντέλου
4D BIM	Microsoft project + Navisworks Timeliner	Σύνδεση δραστηριοτήτων με BIM αντικείμενα και προσομοίωση κατασκευής
5D BIM	Navisworks Quantification	Εξαγωγή ποσοτήτων και υποστήριξη προμετρήσεων/κοστολόγησης

Πηγή: Προσαρμογή από Νασικά, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.

Η σύνδεση του χρονοδιαγράμματος με το μοντέλο πραγματοποιήθηκε στο Autodesk Navisworks. Το τρισδιάστατο μοντέλο εισήχθη στο Navisworks και το

αρχείο του Microsoft Project συνδέθηκε δυναμικά με αυτό. Μέσω του εργαλείου TimeLiner, κάθε δραστηριότητα του χρονοδιαγράμματος αντιστοιχίστηκε σε ένα ή περισσότερα αντικείμενα του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε η προσομοίωση κατασκευής του φράγματος. Η διαδικασία αυτή αποτελεί τον πυρήνα της 4D εφαρμογής, επειδή μετατρέπει το στατικό τρισδιάστατο μοντέλο σε δυναμική αναπαράσταση της κατασκευαστικής εξέλιξης. Έτσι, ο μηχανικός μπορεί πλέον να παρακολουθεί όχι μόνο τι περιλαμβάνει το έργο, αλλά και πότε προβλέπεται να κατασκευαστεί κάθε τμήμα του.

Η πρακτική αξία της 4D προσομοίωσης είναι εμφανής στον τρόπο με τον οποίο υποστηρίζει τον έλεγχο του χρονοδιαγράμματος. Μέσα από το Navisworks, ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο της κατασκευής και να δει ποια αντικείμενα έχουν ολοκληρωθεί, ποια βρίσκονται σε εξέλιξη και ποια πρόκειται να ακολουθήσουν. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για ένα φράγμα, όπου η σειρά των εργασιών έχει άμεση τεχνική σημασία. Για παράδειγμα, οι εκσκαφές και τα έργα εκτροπής προηγούνται της κύριας κατασκευής, ενώ οι στρώσεις του σώματος, ο μανδύας στεγανότητας, οι στοές και τα έργα υπερχειλίστης χρειάζεται να ενταχθούν σε μια ακριβή κατασκευαστική αλληλουχία. Η οπτικοποίηση αυτής της αλληλουχίας επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση πιθανών προβλημάτων και τη βελτίωση του προγραμματισμού πριν από την πραγματική εκτέλεση των εργασιών.

Η 4D εφαρμογή στο φράγμα Βαλσαμιώτη αναδεικνύει τη σημασία της σύγκρισης ανάμεσα στον προγραμματισμό και στην πραγματική εξέλιξη του έργου. Το μοντέλο μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε ο μηχανικός να συγκρίνει το θεωρητικό χρονοδιάγραμμα με την πραγματική πορεία των εργασιών και να εντοπίζει αποκλίσεις. Σε περίπτωση καθυστέρησης ή ανάγκης αλλαγής της κατασκευαστικής σειράς, η προσομοίωση παρέχει δυνατότητα επανεξέτασης της αλληλουχίας και αξιολόγησης εναλλακτικών σεναρίων. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο σε έργα φραγμάτων, όπου οι καθυστερήσεις μπορεί να επηρεάζουν όχι μόνο το κόστος, αλλά και την ασφάλεια, τη διαχείριση των υδάτων και τη δυνατότητα συνέχισης των εργασιών σε συγκεκριμένες περιόδους.

Ένα ακόμη σημαντικό όφελος της 4D προσομοίωσης αφορά την επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων. Η κατασκευή ενός φράγματος απαιτεί συνεργασία πολλών ειδικοτήτων και ομάδων, όπως πολιτικών μηχανικών, γεωτεχνικών,

υδραυλικών μηχανικών, εργοταξιακών στελεχών, μελετητών και φορέων διαχείρισης. Η οπτική παρουσίαση του χρονοδιαγράμματος μπορεί να διευκολύνει την κοινή κατανόηση του έργου και να μειώσει τις ασάφειες που δημιουργούνται όταν η πληροφορία παρουσιάζεται μόνο σε δισδιάστατα σχέδια ή συμβατικούς πίνακες. Η 4D προσομοίωση λειτουργεί ως κοινό πεδίο αναφοράς, στο οποίο οι συμμετέχοντες μπορούν να αντιληφθούν τη σχέση ανάμεσα στον χρόνο, στον χώρο και στις τεχνικές δραστηριότητες.

Παράλληλα, η συγκεκριμένη εφαρμογή δείχνει ότι η ανάπτυξη 4D BIM απαιτεί προσεκτική προετοιμασία. Η δημιουργία της Δομής Ανάλυσης Εργασιών, η οργάνωση του χρονοδιαγράμματος και η αντιστοίχιση κάθε δραστηριότητας με αντικείμενα του μοντέλου είναι διαδικασίες που απαιτούν χρόνο και τεχνική συνέπεια. Εάν το τρισδιάστατο μοντέλο δεν έχει οργανωθεί με κατάλληλη διακριτοποίηση, η σύνδεση με το χρονοδιάγραμμα γίνεται δυσκολότερη. Αντίστοιχα, εάν το χρονοδιάγραμμα δεν είναι δομημένο με τρόπο συμβατό με τα αντικείμενα του μοντέλου, η 4D προσομοίωση χάνει μέρος της λειτουργικότητάς της. Στην περίπτωση του Βαλσαμιώτη, η επιλογή να αναπτυχθεί η Δομή Ανάλυσης Εργασιών με προσανατολισμό το BIM υπήρξε κρίσιμη για τη λειτουργική σύνδεση μοντέλου και χρόνου.

Τέλος, η εφαρμογή της πέμπτης διάστασης του BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη επικεντρώθηκε στην εξαγωγή ποσοτήτων και υλικών από το πληροφοριακό μοντέλο του έργου. Η διαδικασία αυτή εντάσσεται στο BIM 5D, όπου το τρισδιάστατο μοντέλο συνδέεται με ποσοτικά και δυνητικά οικονομικά δεδομένα. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου case study, η 5D εφαρμογή είχε διερευνητικό χαρακτήρα και στόχευσε στην αξιολόγηση της δυνατότητας αξιοποίησης του μοντέλου για προμέτρηση. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για έργα φραγμάτων, επειδή τα έργα αυτά περιλαμβάνουν μεγάλους όγκους υλικών, σύνθετες κατασκευαστικές ενότητες, πολλές διακριτές εργασίες και αυξημένες ανάγκες ελέγχου των ποσοτήτων σε όλα τα στάδια μελέτης και κατασκευής.

Στο φράγμα Βαλσαμιώτη, η εξαγωγή προμετρητικών στοιχείων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εργαλείου Quantification του Autodesk Navisworks. Το εργαλείο αυτό αξιοποιήθηκε για τη συγκέντρωση, οργάνωση και αντιστοίχιση της πληροφορίας που περιείχε το τρισδιάστατο μοντέλο. Η βασική

λογική της διαδικασίας ήταν η σύνδεση των αντικειμένων του μοντέλου με αντίστοιχες εργασίες, υλικά και κατασκευαστικές κατηγορίες. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο απέκτησε λειτουργία πέρα από την οπτική αναπαράσταση, καθώς μετατράπηκε σε βάση ποσοτικής πληροφορίας. Η προμέτρηση μέσω BIM αποκτά ιδιαίτερη αξία, επειδή οι ποσότητες προκύπτουν από τα ίδια τα ψηφιακά αντικείμενα και μπορούν να οργανωθούν με τρόπο που ακολουθεί τη δομή του έργου.

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας ήταν η δημιουργία του Item Catalog. Ο κατάλογος αυτός διαμορφώθηκε μέσω ειδικής φόρμας Excel Catalog Template Tool και χρησιμοποιήθηκε για την οργάνωση των αντικειμένων και των εργασιών που θα περιλαμβάνονταν στην προμέτρηση. Στην εφαρμογή του φράγματος Βαλσαμιώτη, ο Item Catalog βασίστηκε σε απλοποιημένη μορφή της Δομής Ανάλυσης Εργασιών που είχε ήδη αναπτυχθεί για τον 4D χρονοπρογραμματισμό. Η επιλογή αυτή διατηρεί μεθοδολογική συνέχεια ανάμεσα στην τέταρτη και στην πέμπτη διάσταση του BIM, επειδή οι ίδιες ή παρεμφερείς κατασκευαστικές ενότητες μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο για τη χρονική οργάνωση όσο και για την ποσοτική αποτίμηση του έργου. Έτσι, η πληροφορία αποκτά ενιαία δομή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλαπλούς τρόπους.

Παράλληλα με τον Item Catalog δημιουργήθηκε και κατάλογος υλικών και εργασιών, ο οποίος εισήχθη στο πεδίο Resource του Navisworks. Ο κατάλογος αυτός οργανώθηκε με βάση τη βασική γραμμή των ομάδων και εργασιών του προϋπολογισμού της μελέτης. Η πρακτική αυτή επιτρέπει τη σύνδεση του μοντέλου με τη λογική του συμβατικού προϋπολογισμού, ενώ παράλληλα διατηρεί τη δυναμική της ψηφιακής οργάνωσης. Στο πλαίσιο της εφαρμογής καταγράφηκαν τα βασικά υλικά που αντιπροσωπεύουν σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους του έργου. Για ένα φράγμα από σκληρό επίχωμα ή κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, τέτοιες κατηγορίες έχουν κεντρική σημασία, επειδή η οικονομική βαρύτητα του έργου συνδέεται άμεσα με τους μεγάλους όγκους υλικών και με τη συστηματική επανάληψη κατασκευαστικών στρώσεων. Οι τρεις βασικοί κατάλογοι που χρησιμοποιήθηκαν και ο ρόλος τους παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2 Βασικοί κατάλογοι και ο ρόλος τους κατά την διαδικασία BIM 5D στο Autodesk Navisworks.

Κατάλογος	Περιεχόμενο	Ρόλος στην διαδικασία
Item Catalog	Κατηγορίες αντικειμένων	Οργάνωση προμέτρησης
Resource Catalog	Υλικά, εργασίες και υπηρεσίες	Σύνδεση με πόρους
Quantification Workbook	Ποσότητες αντικειμένων	Συγκέντρωση αποτελεσμάτων

Πηγή: Προσαρμογή από Νασικά, Μίχας & Μαμάσης, χ.χ.

Στη συνέχεια οργανώθηκε το Quantification Workbook. Σε αυτό το στάδιο, τα αντικείμενα του μοντέλου αντιστοιχίστηκαν με τα αντικείμενα ή τις εργασίες του Item Catalog και με τα υλικά, τις υπηρεσίες ή τις εργασίες του Resource Catalog. Η αντιστοίχιση αυτή αποτελεί τον πυρήνα της 5D διαδικασίας, επειδή επιτρέπει τη σύνδεση γεωμετρίας, κατασκευαστικής δραστηριότητας και υλικού περιεχομένου. Κάθε αντικείμενο του μοντέλου αποκτά με αυτόν τον τρόπο ποσοτική σημασία και μπορεί να συμμετέχει στη συνολική προμέτρηση του έργου. Το σύστημα συγκεντρώνει τις γεωμετρικές πληροφορίες των επιμέρους αντικειμένων και τις παρουσιάζει συγκεντρωτικά, παρέχοντας στον μηχανικό τη δυνατότητα να παρακολουθεί ποια στοιχεία έχουν συμπεριληφθεί σε κάθε κατηγορία και ποια μεγέθη προκύπτουν από το μοντέλο.

Η δυνατότητα εξαγωγής ποσοτήτων από το μοντέλο έχει άμεση σχέση με την αποδοτικότητα της μελέτης και της κατασκευής. Σε συμβατικές διαδικασίες, η προμέτρηση στηρίζεται συνήθως σε χειροκίνητη ανάγνωση σχεδίων, επιμέρους υπολογισμούς και μεταφορά δεδομένων ανάμεσα σε διαφορετικά αρχεία. Η διαδικασία αυτή μπορεί να απαιτεί σημαντικό χρόνο και αυξημένο έλεγχο συνέπειας. Στο περιβάλλον BIM, οι ποσότητες μπορούν να εξαχθούν από το ίδιο το μοντέλο, εφόσον τα αντικείμενα έχουν δημιουργηθεί και οργανωθεί με κατάλληλο τρόπο. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την ταχύτητα παραγωγής προμετρητικών στοιχείων, βελτιώνει τη διαφάνεια των υπολογισμών και υποστηρίζει τη συνέπεια ανάμεσα στη γεωμετρική και στην ποσοτική πληροφορία.

Η 5D εφαρμογή στο φράγμα Βαλσαμιώτη αναδεικνύει επίσης τη δυνατότητα σύνδεσης της προμέτρησης με τον προϋπολογισμό. Το εργαλείο Quantification παρέχει δυνατότητα εισαγωγής κόστους, μέσω τιμών μονάδας ανά υλικό, εργασία ή υπηρεσία. Έτσι, για έργα όπως το φράγμα Βαλσαμιώτη, η 5D διάσταση έχει ιδιαίτερη

σημασία λόγω της μεγάλης κλίμακας των ποσοτήτων και της ανάγκης συστηματικής παρακολούθησης των υλικών. Ο όγκος του σώματος του φράγματος, οι στρώσεις σκληρού επιχώματος, ο μανδύας στεγανότητας, τα έργα υπερχειλίσης, οι στοές, τα έργα στέψης και τα συνοδά υδραυλικά στοιχεία συγκροτούν ένα πολύπλοκο σύνολο ποσοτικών δεδομένων. Η οργάνωση αυτών των δεδομένων μέσα από το μοντέλο διευκολύνει την κατανόηση της κατανομής των υλικών και υποστηρίζει την πιο τεκμηριωμένη εκτίμηση των αναγκών του έργου. Παράλληλα, η δυνατότητα σύνδεσης της προμέτρησης με το WBS ενισχύει τη συνέχεια ανάμεσα στον χρονικό και στον οικονομικό σχεδιασμό.

Η ανάλυση της 5D προμέτρησης δείχνει ότι το BIM μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο διοίκησης και ελέγχου, και όχι μόνο ως εργαλείο σχεδιασμού. Η πληροφορία που παράγεται από το μοντέλο μπορεί να αξιοποιηθεί για τη λήψη αποφάσεων, την παρακολούθηση της προόδου, την προετοιμασία προϋπολογισμών και την αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών επιλογών. Εάν το μοντέλο ενημερώνεται συστηματικά κατά την εξέλιξη του έργου, η 5D διάσταση μπορεί να υποστηρίξει και τη σύγκριση ανάμεσα στις προβλεπόμενες και στις πραγματικές ποσότητες. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνολογία BIM μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της οικονομικής διαχείρισης και στη μείωση αποκλίσεων ανάμεσα στη μελέτη και στην κατασκευή.

Συνολικά, η εφαρμογή BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη ανέδειξε ένα σύνολο σημαντικών οφελών, τα οποία συνδέονται τόσο με τη μελέτη και την κατασκευή του έργου όσο και με τη συνολική λογική διαχείρισης της τεχνικής πληροφορίας. Το βασικό πλεονέκτημα της προσέγγισης είναι ότι το έργο οργανώνεται σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον, όπου η γεωμετρία, τα υλικά, οι ποσότητες, οι φάσεις κατασκευής και οι τεχνικές προδιαγραφές μπορούν να συσχετιστούν με τα επιμέρους αντικείμενα του μοντέλου. Έτσι, το BIM λειτουργεί ως εργαλείο σύνθεσης της πληροφορίας και όχι απλώς ως μέσο τρισδιάστατης απεικόνισης.

Ακόμη, ένα από τα βασικότερα οφέλη αφορά τη βελτίωση της κατανόησης του έργου. Το φράγμα Βαλσαμιώτη αποτελεί σύνθετη υποδομή, καθώς περιλαμβάνει σώμα από σκληρό επίχωμα, στοές, έργα εκτροπής, υπερχειλιστή, λεκάνη ηρεμίας, πύργο υδροληψίας, έργα εκκένωσης, μανδύα στεγανότητας και έργα στέψης. Η τρισδιάστατη αναπαράσταση αυτών των στοιχείων επιτρέπει στους μηχανικούς να αντιλαμβάνονται τη χωρική σχέση των επιμέρους τμημάτων και να διαμορφώνουν

πληρέστερη εικόνα της κατασκευαστικής λογικής του έργου. Η οπτικοποίηση έχει ιδιαίτερη σημασία σε φράγματα, επειδή η γεωμετρία τους συνδέεται άμεσα με το φυσικό ανάγλυφο, τις στάθμες, τη θεμελίωση και τη λειτουργία των υδραυλικών στοιχείων.

Επίσης, σημαντικό όφελος αποτελεί και η ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκομένων. Η κατασκευή ενός φράγματος απαιτεί τη συμμετοχή διαφορετικών ειδικοτήτων, όπως μελετητών, γεωτεχνικών, υδραυλικών μηχανικών, εργοταξιακών στελεχών και φορέων διαχείρισης. Το BIM παρέχει κοινό ψηφιακό σημείο αναφοράς, μέσα από το οποίο οι επιμέρους ομάδες μπορούν να εργάζονται πάνω στην ίδια πληροφοριακή βάση. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται ο συντονισμός, διευκολύνεται η επικοινωνία και ενισχύεται η διαφάνεια στη διαχείριση των τεχνικών δεδομένων. Η σημασία αυτής της λειτουργίας είναι μεγάλη, επειδή στα σύνθετα έργα υποδομής μεγάλο μέρος της αναποτελεσματικότητας προέρχεται από ασυνέχειες στην ανταλλαγή πληροφορίας και από δυσκολίες συντονισμού μεταξύ πολλών ομάδων.

Επιπρόσθετα, η εφαρμογή BIM συμβάλλει επίσης στη μείωση της απώλειας πληροφορίας κατά τη μετάβαση από τη μία φάση του έργου στην άλλη. Σε συμβατικές διαδικασίες, η πληροφορία συχνά μεταφέρεται μέσα από σχέδια, πίνακες, τεύχη και διαφορετικά αρχεία, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαχείρισης. Στο πληροφοριακό μοντέλο, τα δεδομένα οργανώνονται σε ενιαία δομή και μπορούν να ακολουθούν το έργο από τη μελέτη μέχρι την κατασκευή και τη λειτουργία. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για φράγματα, καθώς πρόκειται για έργα που απαιτούν παρακολούθηση, συντήρηση και διαχείριση σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα.

Η 3D μοντελοποίηση παρείχε ουσιαστικό όφελος στην οπτική και τεχνική αντίληψη της κατασκευής. Μέσω του μοντέλου, τα επιμέρους στοιχεία του φράγματος έγιναν πιο κατανοητά και οι χωρικές τους σχέσεις πιο σαφείς. Η ψηφιακή αναπαράσταση του σώματος, των στοών, του υπερχειλιστή και των συνοδών έργων επιτρέπει τον έλεγχο της διάταξης και της κατασκευαστικής συμβατότητας πριν από την εργοταξιακή εκτέλεση. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει την πρόληψη τεχνικών προβλημάτων, καθώς ορισμένες ασυμβατότητες μπορούν να γίνουν αντιληπτές στο στάδιο της ψηφιακής προκατασκευής.

Στο ίδιο πλαίσιο, η 4D προσομοίωση αποτέλεσε πρόσθετο όφελος, επειδή συνέδεσε το μοντέλο με τον χρόνο κατασκευής. Μέσα από τη σύνδεση του τρισδιάστατου μοντέλου με το χρονοδιάγραμμα, η κατασκευαστική εξέλιξη του έργου έγινε οπτικά παρακολουθήσιμη. Ο μηχανικός μπορεί να εξετάζει την πρόοδο σε διαφορετικά στάδια, να αντιλαμβάνεται την αλληλουχία των εργασιών και να αξιολογεί πιθανές αλλαγές στον προγραμματισμό. Σε φράγματα από σκληρό επίχωμα, όπου η ταχύτητα κατασκευής αποτελεί σημαντικό τεχνικό πλεονέκτημα, η δυνατότητα προηγμένου χρονικού προγραμματισμού αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Η 5D προμέτρηση ανέδειξε την οικονομική και ποσοτική χρησιμότητα του μοντέλου. Η εξαγωγή ποσοτήτων μέσω του Navisworks Quantification επέτρεψε τη σύνδεση των αντικειμένων του μοντέλου με υλικά και εργασίες. Η διαδικασία αυτή παρέχει βάση για πιο οργανωμένη προμέτρηση και μελλοντική κοστολόγηση, εφόσον προστεθούν τιμές μονάδας. Το όφελος αυτό είναι κρίσιμο για έργα μεγάλης κλίμακας, όπως τα φράγματα, όπου οι ποσότητες υλικών είναι μεγάλες και η ακριβής εκτίμησή τους επηρεάζει άμεσα τον προϋπολογισμό και τον οικονομικό έλεγχο του έργου.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα αφορά την αυτοματοποίηση αλλαγών και υπολογισμών. Τα εργαλεία BIM υποστηρίζουν παραμετρική μοντελοποίηση, γεγονός που επιτρέπει την ταχύτερη προσαρμογή του μοντέλου όταν μεταβάλλονται επιμέρους στοιχεία της γεωμετρίας ή των αντικειμένων. Αυτή η δυνατότητα είναι χρήσιμη στη φάση προμελέτης, όπου εξετάζονται διαφορετικά σενάρια τεχνικής λύσης. Η ταχεία οπτικοποίηση, η ενδεικτική εκτίμηση ποσοτήτων και η δυνατότητα σύγκρισης εναλλακτικών επιλογών μπορούν να ενισχύσουν τη λήψη αποφάσεων και να βοηθήσουν τους μελετητές να αξιολογήσουν λύσεις με πληρέστερη τεχνική πληροφόρηση.

Η εφαρμογή BIM συνδέεται επίσης με τη δυνατότητα εντοπισμού συγκρούσεων και τεχνικών ασυμβατοτήτων. Αν και ο έλεγχος συγκρούσεων δεν αποτέλεσε αντικείμενο της συγκεκριμένης εφαρμογής, η σχετική δυνατότητα αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των εργαλείων BIM. Σε φράγματα, όπου συνυπάρχουν υπόγειες στοές, υδραυλικά έργα, δομικά στοιχεία, επιφάνειες εδάφους και γραμμικές κατασκευές, ο έγκαιρος εντοπισμός ασυμβατοτήτων μπορεί να περιορίσει λάθη, καθυστερήσεις και πρόσθετες εργασίες στο εργοτάξιο.

Τέλος, το BIM παρουσιάζει προοπτική αξιοποίησης και στη φάση λειτουργίας του φράγματος. Τα φράγματα απαιτούν διαρκή παρακολούθηση, επιθεώρηση και διαχείριση για λόγους λειτουργικότητας και ασφάλειας. Η ανάπτυξη ενός πληροφοριακού μοντέλου μπορεί να αποτελέσει βάση για μελλοντική σύνδεση με δεδομένα συντήρησης, ελέγχου και διαχείρισης εγκαταστάσεων. Έτσι, το BIM μπορεί να λειτουργήσει όχι μόνο ως εργαλείο μελέτης και κατασκευής, αλλά και ως ψηφιακή υποδομή για τη διαχείριση του κύκλου ζωής του έργου.

Συνολικά, η εφαρμογή BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη ανέδειξε οφέλη που συνδέονται με την οπτικοποίηση, τον συντονισμό, τη συνεργασία, τον χρονοπρογραμματισμό, την προμέτρηση, τη διαχείριση πληροφορίας και τη μελλοντική λειτουργία του έργου. Η περίπτωση δείχνει ότι το BIM μπορεί να ενισχύσει ουσιαστικά την αποδοτικότητα σύνθετων έργων υποδομής, αρκεί το μοντέλο να οργανώνεται με βάση τη δομή του έργου, τις ανάγκες των χρηστών και τις απαιτήσεις κάθε φάσης του κύκλου ζωής.

Συζήτηση

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι το Building Information Modeling αποτελεί μία σύνθετη ψηφιακή μεθοδολογία, η οποία μετασχηματίζει τον τρόπο με τον οποίο οργανώνεται, παράγεται, ανταλλάσσεται και αξιοποιείται η τεχνική πληροφορία στον κατασκευαστικό κλάδο. Η συμβολή του BIM συνδέεται με τη μετάβαση από αποσπασματικές μορφές τεχνικής τεκμηρίωσης σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον, όπου η γεωμετρία, τα υλικά, οι ποσότητες, ο χρόνος, το κόστος και οι λειτουργικές πληροφορίες μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους. Με βάση τη θεωρητική ανάλυση, το BIM προσεγγίζεται ως τεχνολογικό εργαλείο, ως μέθοδος συνεργασίας και ως πλαίσιο διαχείρισης του κύκλου ζωής ενός έργου. Η σύνδεση αυτή επιβεβαιώνει ότι η αξία του BIM βρίσκεται στη δυνατότητα ενοποίησης της πληροφορίας και στη διαμόρφωση μιας κοινής βάσης αναφοράς για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς (Eastman et al., 2018; Sacks et al., 2018).

Η αποδοτικότητα του BIM συνδέεται επίσης με την παραγωγικότητα και τη συνεργασία. Οι Poirier et al. (2015) έδειξαν ότι η εφαρμογή του BIM σε εξειδικευμένη εργοληπτική επιχείρηση μπορεί να ενισχύσει την παραγωγικότητα της εργασίας, κυρίως όταν συνδέεται με προκατασκευή και καλύτερη οργάνωση των συνεργείων. Οι Cao et al. (2015, 2017, 2018) ανέδειξαν ότι η αποτελεσματικότητα του BIM επηρεάζεται από τη διαοργανωσιακή συνεργασία, την υποστήριξη του πελάτη, την ανταλλαγή πληροφοριών και τη θέση των επιχειρήσεων σε δίκτυα συνεργασίας. Η διάσταση αυτή είναι κρίσιμη, επειδή δείχνει ότι το BIM παράγει ουσιαστικά οφέλη όταν συνδυάζεται με οργανωτική ωριμότητα και συνεργατική κουλτούρα. Με άλλα λόγια, η τεχνολογία αποκτά πρακτική αξία όταν εντάσσεται σε ένα περιβάλλον όπου οι φορείς του έργου μοιράζονται δεδομένα, ευθύνες και αποφάσεις.

Η μελέτη περίπτωσης του φράγματος Βαλσαμιώτη επιβεβαίωσε πρακτικά πολλές από τις θεωρητικές και εμπειρικές διαπιστώσεις της βιβλιογραφίας. Η εφαρμογή του BIM σε ένα σύνθετο υδραυλικό έργο έδειξε ότι η τεχνολογία μπορεί να αξιοποιηθεί και πέρα από το πεδίο των κτιριακών έργων. Το φράγμα αποτελεί έργο με σύνθετη γεωμετρία, μεγάλο αριθμό επιμέρους στοιχείων, υδραυλικές λειτουργίες, στοές, υπερχειλιστή, έργα στέψης, μανδύα στεγανότητας και σημαντικές ποσότητες

υλικών. Η ανάπτυξη του 3D μοντέλου σε LOD 200 παρείχε λειτουργική βάση για την κατανόηση της μορφολογίας και για τη διακριτοποίηση των κατασκευαστικών στοιχείων. Η επιλογή αυτή δείχνει ότι η αξία του μοντέλου συνδέεται με τον σκοπό της χρήσης του και με το στάδιο ανάπτυξης της πληροφορίας.

Η 4D εφαρμογή στο φράγμα Βαλσαμιώτη ανέδειξε τη σημασία της χρονικής προσομοίωσης για έργα μεγάλης τεχνικής πολυπλοκότητας. Η σύνδεση του μοντέλου με το χρονοδιάγραμμα μέσω Microsoft Project και Navisworks επέτρεψε την οπτική αναπαράσταση της κατασκευαστικής εξέλιξης. Η δυνατότητα παρακολούθησης διαφορετικών ποσοστών ολοκλήρωσης καθιστά το χρονοδιάγραμμα περισσότερο κατανοητό και λειτουργικό για τους μηχανικούς και τους διαχειριστές έργου. Το εύρημα αυτό συνδέεται με τη διεθνή βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία το BIM ενισχύει τον χρονικό συντονισμό και επιτρέπει καλύτερη κατανόηση της αλληλουχίας των εργασιών (Franz & Messner, 2019; Lu et al., 2014).

Η 5D εφαρμογή συμπλήρωσε την ανάλυση, καθώς έδειξε ότι το πληροφοριακό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξαγωγή ποσοτήτων και οργάνωση υλικών. Η χρήση του Navisworks Quantification, του Item Catalog και του Resource Catalog έδειξε ότι το BIM μπορεί να μετατραπεί σε βάση προμετρητικής πληροφορίας. Αν και η παράμετρος του κόστους παρέμεινε σε διερευνητικό επίπεδο, η δυνατότητα προσθήκης τιμών μονάδας δείχνει ότι το μοντέλο θα μπορούσε να υποστηρίξει πλήρη προϋπολογισμό. Η διαπίστωση αυτή συνδέει άμεσα τη μελέτη περίπτωσης με τη βιβλιογραφία για την οικονομική αποδοτικότητα του BIM και επιβεβαιώνει ότι η τεχνολογία μπορεί να ενισχύσει την ακρίβεια, τη διαφάνεια και την ταχύτητα της προμέτρησης (Barlisch & Sullivan, 2012; Giel & Issa, 2013).

Η συνολική συζήτηση δείχνει ότι το BIM αποτελεί ταυτόχρονα τεχνολογική και οργανωτική καινοτομία. Τα οφέλη του αφορούν την οπτικοποίηση, τη συνεργασία, τον συντονισμό, την πρόβλεψη συγκρούσεων, την προσομοίωση, την προμέτρηση και τη μακροχρόνια διαχείριση του έργου. Παράλληλα, η επιτυχής εφαρμογή του προϋποθέτει εκπαίδευση, επένδυση, διαλειτουργικότητα, σαφή κατανομή ρόλων και οργανωτική προσαρμογή. Η περίπτωση του φράγματος Βαλσαμιώτη δείχνει ότι η εφαρμογή BIM σε έργα υποδομής είναι εφικτή και ιδιαίτερα χρήσιμη, ιδίως όταν το έργο διαθέτει σύνθετη γεωμετρία και αυξημένες ανάγκες χρονικού και ποσοτικού ελέγχου. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση και το case

study συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι το BIM μπορεί να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα του κατασκευαστικού κλάδου, εφόσον αντιμετωπιστεί ως ολοκληρωμένη μεθοδολογία διαχείρισης πληροφορίας και όχι ως μεμονωμένο λογισμικό εργαλείο.

Συμπεράσματα και προτάσεις

Η παρούσα εργασία εξέτασε τη χρησιμότητα και την αποτελεσματικότητα των BIM προγραμμάτων στον κατασκευαστικό κλάδο, συνδυάζοντας θεωρητική ανάλυση, διεθνή εμπειρική βιβλιογραφία και μελέτη περίπτωσης και εκτίμησης των πλεονεκτημάτων εφαρμογής BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη, στα Χανιά Κρήτης. Από τη συνολική ανάλυση προκύπτει ότι το BIM αποτελεί μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία ψηφιακής διαχείρισης τεχνικών έργων, η οποία συνδέει τον σχεδιασμό, τη μοντελοποίηση, τη συνεργασία, τον χρονικό προγραμματισμό, την προμέτρηση και τη μελλοντική διαχείριση του έργου σε ένα ενιαίο πληροφοριακό περιβάλλον. Η αξία του BIM εντοπίζεται στη δυνατότητα συγκέντρωσης και οργάνωσης της τεχνικής πληροφορίας με τρόπο που ενισχύει τη λήψη αποφάσεων, τη διαφάνεια, τον συντονισμό και την αποδοτικότητα των κατασκευαστικών διαδικασιών.

Σε σχέση με την έννοια και τα βασικά χαρακτηριστικά του BIM, η εργασία κατέληξε ότι το BIM υπερβαίνει την απλή τρισδιάστατη απεικόνιση. Αποτελεί ένα δυναμικό πληροφοριακό μοντέλο, το οποίο ενσωματώνει γεωμετρικά, τεχνικά, χρονικά, οικονομικά και λειτουργικά δεδομένα. Μέσα από αυτή τη λογική, το έργο αντιμετωπίζεται ως σύνολο αντικειμένων με ιδιότητες και σχέσεις, και όχι ως άθροισμα ανεξάρτητων σχεδίων. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά το BIM ιδιαίτερα χρήσιμο σε σύνθετα έργα, όπου η ακρίβεια της πληροφορίας, η συνεργασία πολλών ειδικοτήτων και η διαχείριση αλλαγών έχουν καθοριστική σημασία για την επιτυχή ολοκλήρωση.

Ως προς τα λογισμικά BIM, η εργασία ανέδειξε ότι η αποτελεσματική εφαρμογή τους στηρίζεται στον συνδυασμό εξειδικευμένων εργαλείων. Το Revit, το ArchiCAD, το Tekla Structures, τα εργαλεία της Bentley, το Civil 3D και το Navisworks καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες της ψηφιακής μελέτης και κατασκευής. Η περίπτωση του φράγματος Βαλσαμιώτη έδειξε έμπρακτα αυτή τη συμπληρωματικότητα, καθώς το Revit χρησιμοποιήθηκε για τη βασική μοντελοποίηση, το Civil 3D για τοπογραφικά και γεωμετρικά στοιχεία, το Microsoft Project για τη σύνταξη του χρονοδιαγράμματος και το Navisworks για τη σύνδεση του μοντέλου με τον χρόνο και τις ποσότητες. Η εφαρμογή αυτή επιβεβαιώνει ότι η

διαλειτουργικότητα αποτελεί κεντρική προϋπόθεση για την πλήρη αξιοποίηση του BIM σε έργα υποδομής.

Σε σχέση με τη συμβολή του BIM στη βελτίωση του συντονισμού, της ποιότητας, του χρόνου και του κόστους, η διεθνής βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι η χρήση του συνδέεται με σημαντικά λειτουργικά και οικονομικά οφέλη. Οι εμπειρικές μελέτες που εξετάστηκαν έδειξαν ότι το BIM συμβάλλει στη μείωση σφαλμάτων, στη βελτίωση της επικοινωνίας, στην ακριβέστερη προμέτρηση, στον καλύτερο έλεγχο του χρονοδιαγράμματος και στη μεγαλύτερη προβλεψιμότητα του έργου. Παράλληλα, η σύνδεσή του με 4D και 5D λειτουργίες ενισχύει τη διαχείριση χρόνου και κόστους, καθώς επιτρέπει την οπτική παρακολούθηση της κατασκευής και την εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων από το μοντέλο. Η εργασία δείχνει ότι η αποδοτικότητα του BIM προκύπτει κυρίως όταν η τεχνολογία εντάσσεται από τα πρώτα στάδια του έργου και οργανώνεται με σαφή μεθοδολογία.

Η μελέτη περίπτωσης του φράγματος Βαλσαμιώτη προσέφερε ουσιαστική πρακτική τεκμηρίωση της χρησιμότητας του BIM σε έργα υποδομής. Το έργο, ως αρδευτικό φράγμα από σκληρό επίχωμα, με ύψος 67,2 m, όγκο σώματος 600.000 m³ και ταμιευτήρα 6 hm³, αποτελεί σύνθετο τεχνικό αντικείμενο με σημαντικές απαιτήσεις γεωμετρικής, υδραυλικής και κατασκευαστικής ακρίβειας. Στο case study περιγράφηκε η εφαρμογή BIM και αξιολογήθηκαν τα οφέλη από την εφαρμογή αυτή. Το έργο διακριτοποιήθηκε με βάση τα υλικά, τη μορφή και τον τρόπο κατασκευής του. Η διακριτοποίηση αυτή επέτρεψε την οργάνωση του σώματος του φράγματος, των συνοδών έργων, των στοών, του υπερχειλιστή, των έργων υδροληψίας και εκκένωσης σε επιμέρους ψηφιακά αντικείμενα.

Η εφαρμογή 3D BIM στο φράγμα Βαλσαμιώτη έδειξε ότι τα έργα φραγμάτων μπορούν να αποδοθούν αποτελεσματικά ως πληροφοριακά μοντέλα, εφόσον προηγείται κατάλληλη ανάλυση των κατασκευαστικών στοιχείων και επιλογή επιπέδου ανάπτυξης. Το LOD 200 παρείχε επαρκή βάση για τη διερεύνηση της γεωμετρίας, των ποσοτικών σχέσεων και της γενικής κατασκευαστικής οργάνωσης του έργου. Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση συνέβαλε στην καλύτερη κατανόηση της μορφής του φράγματος, στη χωρική συσχέτιση των επιμέρους κατασκευών και στη δημιουργία βάσης για περαιτέρω ψηφιακές εφαρμογές. Η 3D διάσταση λειτούργησε ως θεμέλιο για τον 4D χρονοπρογραμματισμό και την 5D προμέτρηση.

Η 4D εφαρμογή έδειξε τη χρησιμότητα του BIM στον χρονικό προγραμματισμό. Οι εργασίες κατανεμήθηκαν σε δραστηριότητες και υποδραστηριότητες, προσδιορίστηκαν οι χρονικές αλληλουχίες και δημιουργήθηκε χρονοδιάγραμμα κατασκευής, το οποίο συνδέθηκε με το μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο, η κατασκευή μπορούσε να προσομοιωθεί ψηφιακά και να παρακολουθηθεί ως χρονικά εξελισσόμενη διαδικασία. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει την κατανόηση της κατασκευαστικής αλληλουχίας, υποστηρίζει τον έλεγχο προόδου και διευκολύνει τη σύγκριση ανάμεσα στον προγραμματισμό και στην πραγματική εξέλιξη του έργου.

Η 5D εφαρμογή ανέδειξε την αξία του BIM για την εξαγωγή ποσοτήτων και την υποστήριξη της οικονομικής διαχείρισης. Με τη χρήση εργαλείων BIM και της διαθέσιμης γεωμετρικής πληροφορίας, ελήφθησαν προμετρητικά στοιχεία για τα περισσότερα αντικείμενα του μοντέλου και για βασικά υλικά. Η προσέγγιση αυτή δείχνει ότι το BIM μπορεί να λειτουργήσει ως βάση για πιο συστηματική προμέτρηση και, με την προσθήκη τιμών μονάδας, για προϋπολογισμό έργου. Επομένως, η 5D διάσταση συνδέει το πληροφοριακό μοντέλο με την οικονομική αποδοτικότητα και τη διαχείριση κόστους.

Παράλληλα, η εργασία ανέδειξε κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματική υιοθέτηση του BIM. Η τεχνολογία απαιτεί εκπαίδευση χρηστών, οργανωτική προσαρμογή, επένδυση σε λογισμικό και εξοπλισμό, σαφείς ρόλους, συνεργατικές διαδικασίες και θεσμική υποστήριξη. Η μετάβαση από CAD σε BIM αποτελεί αλλαγή μεθόδου εργασίας και όχι απλή αντικατάσταση εργαλείου. Ειδικά σε έργα υποδομής, όπου συνδυάζονται τοπογραφικά, υδραυλικά, δομικά και γεωτεχνικά δεδομένα, η επιτυχής εφαρμογή απαιτεί προσεκτική οργάνωση δεδομένων και υψηλό επίπεδο διαλειτουργικότητας.

Απαντώντας στα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν στην παρούσα έρευνα, αρχικά ως προς το πρώτο ερευνητικό ερώτημα, η εργασία κατέληξε ότι το BIM αποτελεί μια ολοκληρωμένη ψηφιακή μεθοδολογία μοντελοποίησης και διαχείρισης πληροφοριών στον κατασκευαστικό κλάδο. Η έννοιά του υπερβαίνει την απλή τρισδιάστατη απεικόνιση, καθώς συνδέει το γεωμετρικό μοντέλο με τεχνικά, λειτουργικά, χρονικά, οικονομικά και διαχειριστικά δεδομένα. Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι η παραμετρική μοντελοποίηση, η κοινή βάση πληροφορίας, η συνεργασία μεταξύ των εμπλεκομένων, η υποστήριξη του κύκλου ζωής του έργου

και η δυνατότητα σύνδεσης του μοντέλου με χρόνο, κόστος, ποσότητες και λειτουργία.

Ως προς το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα, διαπιστώθηκε ότι τα συχνότερα αξιοποιούμενα BIM λογισμικά καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες της μελέτης και της κατασκευής. Το Revit χρησιμοποιείται κυρίως για παραμετρική μοντελοποίηση και παραγωγή πληροφοριακών μοντέλων, το Civil 3D για τοπογραφικά, γεωμετρικά και έργα υποδομής, το Navisworks για συντονισμό, 4D προσομοίωση και 5D προμέτρηση, ενώ λογισμικά όπως το ArchiCAD, το Tekla Structures και τα εργαλεία της Bentley υποστηρίζουν αρχιτεκτονική, στατική, κατασκευαστική και διαλειτουργική μοντελοποίηση. Η αποτελεσματική χρήση του BIM στηρίζεται επομένως στον συνδυασμό εργαλείων και στη σωστή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους.

Ως προς το τρίτο ερευνητικό ερώτημα, η εργασία έδειξε ότι η εφαρμογή του BIM συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση του συντονισμού, στη μείωση σφαλμάτων, στη διαχείριση χρόνου και κόστους, στην ενίσχυση της ποιότητας και στη βιωσιμότητα των έργων. Η συμβολή αυτή προκύπτει από την καλύτερη οπτικοποίηση, την έγκαιρη αναγνώριση ασυμβατοτήτων, την ακριβέστερη προμέτρηση, τη σύνδεση του μοντέλου με το χρονοδιάγραμμα και τη δυνατότητα αξιοποίησης δεδομένων σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Το BIM αυξάνει την αποδοτικότητα κυρίως όταν εφαρμόζεται από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού και όταν οι εμπλεκόμενοι εργάζονται σε κοινό ψηφιακό περιβάλλον.

Ως προς το τέταρτο ερευνητικό ερώτημα, η αποτελεσματική υιοθέτηση των BIM προγραμμάτων επηρεάζεται από τεχνολογικούς, οικονομικούς, οργανωτικούς και ανθρώπινους παράγοντες. Κρίσιμη σημασία έχουν η εκπαίδευση των χρηστών, η επένδυση σε κατάλληλο λογισμικό και εξοπλισμό, η διαλειτουργικότητα, η ύπαρξη σαφών ρόλων, η συνεργατική κουλτούρα, η θεσμική υποστήριξη και η ένταξη του BIM στις διαδικασίες μελέτης, δημοπράτησης, κατασκευής και λειτουργίας. Η μετάβαση από CAD σε BIM αποτελεί αλλαγή τρόπου εργασίας και απαιτεί οργανωτική προσαρμογή.

Τέλος, ως προς το πέμπτο ερευνητικό ερώτημα, η χρησιμότητα του BIM αποτυπώθηκε πρακτικά μέσα από τη μελέτη περίπτωσης του φράγματος Βαλσαμιώτη. Η εφαρμογή έδειξε ότι ένα σύνθετο έργο υποδομής μπορεί να

μετατραπεί από δισδιάστατη τεχνική πληροφορία σε οργανωμένο πληροφοριακό μοντέλο. Η ανάπτυξη 3D μοντέλου σε LOD 200 βοήθησε στην κατανόηση της γεωμετρίας και των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων, η 4D σύνδεση με το χρονοδιάγραμμα υποστήριξε την οπτική παρακολούθηση της κατασκευαστικής αλληλουχίας και η 5D προμέτρηση ανέδειξε τη δυνατότητα εξαγωγής ποσοτήτων από το μοντέλο. Η περίπτωση του φράγματος επιβεβαιώνει ότι το BIM μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά και σε έργα υποδομής, πέρα από τα συνήθη κτιριακά έργα.

Με βάση τα παραπάνω, η πρώτη πρόταση αφορά την ανάγκη συστηματικής εκπαίδευσης των επαγγελματιών του κατασκευαστικού κλάδου. Οι μηχανικοί, οι μελετητές, οι εργολάβοι και τα στελέχη διαχείρισης έργων χρειάζεται να αποκτήσουν ουσιαστικές δεξιότητες στη μοντελοποίηση, στον συντονισμό, στη διαχείριση πληροφοριών και στη χρήση 4D και 5D εργαλείων. Η εκπαίδευση μπορεί να ενταχθεί τόσο στα προγράμματα σπουδών των πολυτεχνικών σχολών όσο και σε προγράμματα επαγγελματικής κατάρτισης.

Η δεύτερη πρόταση αφορά την υιοθέτηση οργανωμένου BIM Execution Plan σε κάθε σημαντικό τεχνικό έργο. Το σχέδιο αυτό μπορεί να καθορίζει τους στόχους του BIM, το επίπεδο ανάπτυξης του μοντέλου, τις ευθύνες των εμπλεκόμενων, τα λογισμικά που θα χρησιμοποιηθούν, τα πρότυπα ανταλλαγής δεδομένων, τη δομή των αντικειμένων, τον τρόπο ελέγχου ποιότητας και τις διαδικασίες ενημέρωσης του μοντέλου. Με αυτή την πρακτική, το BIM αποκτά σαφή λειτουργικό ρόλο από την αρχή του έργου.

Η τρίτη πρόταση αφορά τη θεσμική ενίσχυση του BIM στον δημόσιο τομέα. Η σταδιακή ενσωμάτωση απαιτήσεων BIM σε προκηρύξεις, τεχνικές προδιαγραφές και διαδικασίες δημοπράτησης μπορεί να λειτουργήσει ως μοχλός εκσυγχρονισμού. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι οι χώρες που ανέπτυξαν οργανωμένη δημόσια πολιτική για το BIM πέτυχαν ταχύτερη διάδοση και μεγαλύτερη ωριμότητα στην εφαρμογή του. Για την Ελλάδα, μια αντίστοιχη στρατηγική μπορεί να συμβάλει στην αναβάθμιση της ποιότητας των τεχνικών έργων και στη βελτίωση της διαχείρισης δημόσιων πόρων.

Τέλος, για μελλοντική έρευνα προτείνεται η εκπόνηση συγκριτικών μελετών σε περισσότερα τεχνικά έργα, ώστε να αξιολογηθεί ποσοτικά η συμβολή του BIM σε

χρόνο, κόστος, ποιότητα και παραγωγικότητα. Ιδιαίτερη αξία θα είχε η σύγκριση έργων με και χωρίς BIM, καθώς και η διερεύνηση της απόδοσης επένδυσης σε ελληνικές τεχνικές εταιρείες.

Συμπερασματικά, η εργασία καταλήγει ότι τα BIM προγράμματα αποτελούν σημαντικό εργαλείο εκσυγχρονισμού του κατασκευαστικού κλάδου. Η χρησιμότητά τους εκφράζεται μέσα από την καλύτερη οργάνωση της πληροφορίας, την ενίσχυση της συνεργασίας, τη βελτίωση του συντονισμού, την υποστήριξη της προμέτρησης, τον χρονικό έλεγχο και τη δυνατότητα μακροχρόνιας διαχείρισης των έργων. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την ποιότητα της εφαρμογής, την εκπαίδευση των χρηστών, την οργανωτική ωριμότητα και τη θεσμική υποστήριξη. Η περίπτωση του φράγματος Βαλσαμιώτη επιβεβαιώνει ότι το BIM μπορεί να εφαρμοστεί με ουσιαστικό τρόπο και σε σύνθετα έργα υποδομής, προσφέροντας σημαντικές δυνατότητες για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη διαχείριση των τεχνικών έργων.

Βιβλιογραφία

Διεθνής

Ahmed, S. M., Emam, H. H., & Farrell, P. (2014). Barriers to BIM/4D implementation in Qatar. In *Proceedings of the 1st International Conference of CIB Middle East and North Africa Research Network* (pp. 533–547).

Aish, R. (1986). Building modelling: The key to integrated construction CAD. In *CIB 5th International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Building* (pp. 55–67).

Ajam, M., Alshawih, M., & Mezher, T. (2010). Augmented process model for e-tendering: Towards integrating object models with document management systems. *Automation in Construction*, 19(6), 762–778. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.04.001>

Allen, C., & Shakantu, W. (2016). The BIM revolution: A literature review on rethinking the business of construction. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 204, 919–930. <https://doi.org/10.2495/SC160751>

Allison, H. (2010). *10 reasons why project managers should champion 5D BIM software*. VICO Software. <http://www.vicosoftware.com/vico-blogs/guest-blogger/tabid/88454/bid/27701/10-Reasons-Why-Project-Managers-Should-Champion-5D-BIM-Software.aspx>

Almuntaser, T., Sanni-Anibire, M. O., & Hassanain, M. A. (2018). Adoption and implementation of BIM: Case study of a Saudi Arabian AEC firm. *International Journal of Managing Projects in Business*, 11(3), 608–624. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-05-2017-0046>

Anumba, C. J., Issa, R. R. A., Pan, J., & Mutis, I. (2008). Ontology-based information and knowledge management in construction. *Construction Innovation*, 8(3), 218–239. <https://doi.org/10.1108/14714170810888976>

Aranda-Mena, G., Crawford, J., Chevez, A., & Froese, T. (2009). Building information modelling demystified: Does it make business sense to adopt BIM? *International Journal of Managing Projects in Business*, 2(3), 419–434. <https://doi.org/10.1108/17538370910971063>

Arayici, Y., Coates, P., Koskela, L., Kagioglou, M., Usher, C., & O'Reilly, K. (2011). BIM adoption and implementation for architectural practices. *Structural Survey*, 29(1), 7–25. <https://doi.org/10.1108/02630801111118377>

Autodesk. (2002). *Building information modeling* [White paper]. http://www.laiserin.com/features/bim/autodesk_bim.pdf

Autodesk. (2015). *Top 10 benefits of BIM*. https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/autocadforconstruction/Autodesk_Top10BenefitsOfBIM.pdf

Azhar, S. (2011). Building information modeling BIM: Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)

Babatunde, S. O., Perera, S., Ekundayo, D., & Adeleye, T. E. (2020). An investigation into BIM-based detailed cost estimating and drivers to the adoption of BIM in quantity surveying practices. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 25(1), 61–81. <https://doi.org/10.1108/JFMPC-05-2019-0042>

Barlish, K., & Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM: A case study approach. *Automation in Construction*, 24, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008>

Becerik-Gerber, B., & Rice, S. (2010). The perceived value of building information modeling in the U.S. building industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 15, 185–201. <https://www.itcon.org/2010/15>

Bello, S. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Bilal, M., Davila Delgado, J. M., Akanbi, L. A., Ajayi, A. O., & Owolabi, H. A. (2021). Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges. *Automation in Construction*, 122, Article 103441. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>

Bernard, F. (2010, November 26). *The Dassault Systèmes success story*. isicad. http://isicad.net/articles.php?article_num=14120

BIMware. (n.d.). *Histoire de Robobat et BIMware*. <https://bimware.com/fr/societe/histoire.html>

Björk, B.-C. (2009). RATAS, a longitudinal case study of an early construction IT roadmap project. *Journal of Information Technology in Construction*, 14, 385–399. <https://www.itcon.org/2009/25>

Both, P. V., Koch, V., & Kindsvater, A. (2012). *Potentials and barriers for implementing BIM in the German AEC market: Results of a current market analysis*. Karlsruhe Institute of Technology, Department Building Lifecycle Management. https://www.irbnet.de/daten/kbf/kbf_e_F_2844.pdf

Breit, M., Vogel, M., Häubi, F., Märki, F., Soldati, M., Etesi, L. I., Hochmuth, N., & Walther, A. (2008). Enhancement of virtual design and construction methods. In L. Rischmoller (Ed.), *CIB W78 2008 International Conference on Information Technology in Construction: Improving the management of construction projects through IT adoption* (pp. 280–291). Universidad de Talca. <https://itc.scix.net/pdfs/w78-2008-4-05.pdf>

Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>

British Standards Institution, & buildingSMART UK. (2010). *Constructing the business case: Building Information Modelling*. British Standards Institution.

buildingSMART International. (n.d.). *Industry Foundation Classes (IFC): An introduction*. <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>

C.T.C.E. Cluj. (n.d.). *Principalele realizări și activități prestate de CTCE Cluj*. <https://www.ctcecluj.ro/fondarea-informaticii-clujene-extrase/>

Cao, D., Li, H., & Wang, G. (2017). Impacts of building information modeling (BIM) implementation on design and construction performance: A resource dependence

theory perspective. *Frontiers of Engineering Management*, 4(1), 20–34.
<https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017010>

Cao, D., Li, H., Wang, G., Luo, X., & Tan, D. (2018). Relationship network structure and organizational competitiveness: Evidence from BIM implementation practices in the construction industry. *Journal of Management in Engineering*, 34(3), Article 04018005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000600](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000600)

Cao, D., Wang, G., Li, H., Skitmore, M., Huang, T., & Zhang, W. (2015). Practices and effectiveness of building information modelling in construction projects in China. *Automation in Construction*, 49, 113–122.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.014>

Chan, C. T. W. (2014). Barriers of implementing BIM in construction industry from the designers' perspective: A Hong Kong experience. *Journal of System and Management Sciences*, 4(2), 24–40.
https://www.aasmr.org/jsms/Vol4/No.2/JSMS_VOL4_NO2_003.pdf

Chan, D. W. M., Olawumi, T. O., & Ho, A. M. L. (2019). Perceived benefits of and barriers to Building Information Modelling (BIM) implementation in construction: The case of Hong Kong. *Journal of Building Engineering*, 25, Article 100764.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100764>

Charehzehi, A., Chai, C., Md Yusof, A., Chong, H.-Y., & Loo, S. C. (2017). Building information modeling in construction conflict management. *International Journal of Engineering Business Management*, 9, Article 1847979017746257.
<https://doi.org/10.1177/1847979017746257>

Cicmil, S., & Marshall, D. (2005). Insights into collaboration at the project level: Complexity, social interaction and procurement mechanisms. *Building Research & Information*, 33(6), 523–535. <https://doi.org/10.1080/09613210500288886>

Darko, A., Chan, A. P. C., Yang, Y., & Tetteh, M. O. (2020). Building information modeling (BIM)-based modular integrated construction risk management: Critical survey and future needs. *Computers in Industry*, 123, Article 103327.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103327>

Data Design System. (n.d.). *About Data Design System*. <https://www.dds-cad.net/company/>

Datta, S. D., Sobuz, M. H. R., Mim, N. J., & Nath, A. D. (2023). Investigation on the effectiveness of using Building Information Modeling (BIM) tools in project management: A case study. *Revista de la Construcción*, 22(2), 306–323. <https://doi.org/10.7764/rdlc.22.2.306>

Eadie, R., Odeyinka, H., Browne, M., McKeown, C., & Yohanis, M. (2013). An analysis of the drivers for adopting building information modelling. *Journal of Information Technology in Construction*, 18, 338–352. <https://www.itcon.org/2013/17>

Eastman, C. (1975). The use of computers instead of drawings in building design. *AIA Journal*, 63(3), 46–50.

Eastman, C., & Henrion, M. (1977). GLIDE: A language for design information systems. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 11(2), 24–33. <https://doi.org/10.1145/965141.563895>

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). Wiley.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors* (2nd ed.). Wiley.

EL Mounla, K., Beladjine, D., Beddiar, K., & Mazari, B. (2023). Lean-BIM approach for improving the performance of a construction project in the design phase. *Buildings*, 13(3), Article 654. <https://doi.org/10.3390/buildings13030654>

Engelbart, D. C. (1962). *Augmenting human intellect: A conceptual framework*. Stanford Research Institute. http://www.doungengelbart.org/pubs/papers/scanned/Doug_Engelbart-AugmentingHumanIntellect.pdf

European Commission. (n.d.). *Methodology, tools and architectures for electronic consistent knowledge management across projects and between enterprises in the construction domain*. CORDIS EU Research Results. <https://cordis.europa.eu/project/id/IST-2000-28671>

Forcada, N., Casals, M., Roca, X., & Gangolells, M. (2007). Adoption of web databases for document management in SMEs of the construction sector in Spain. *Automation in Construction*, 16(4), 411–424. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.07.011>

Franz, B., & Messner, J. I. (2019). Evaluating the impact of Building Information Modeling on project performance. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(3), Article 04019015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000832](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000832)

Froidevaux, Y. (2003). Bibliographie: Perret T. et al., *Microtechnique et mutations horlogères: Clairvoyance et ténacité dans l'arc jurassien*. *Revue Historique Neuchâteloise*, 1, 88–91.

Gamil, Y., & Rahman, I. A. R. (2019). Awareness and challenges of building information modelling (BIM) implementation in the Yemen construction industry. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 17(5), 1077–1084. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2019-0063>

Gerbino, S., Cieri, L., Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2021). On BIM interoperability via the IFC standard: An assessment from the structural engineering and design viewpoint. *Applied Sciences*, 11(23), Article 11430. <https://doi.org/10.3390/app112311430>

Giel, B. K., & Issa, R. R. A. (2013). Return on investment analysis of using Building Information Modeling in construction. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(5), 511–521. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000164)

Goldstein, B. L. M., Kemmerer, S. J., & Parks, C. H. (1998). *A brief history of early product data exchange standards* (NISTIR 6221). National Institute of Standards and Technology. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6221.pdf>

GRAITEC. (n.d.). *Products: Global CAD, analysis and design solutions for the construction engineering field*. <https://www.graitec.com/products/>

Graphisoft. (2004). *Vállaljuk a kihívásokat* [Brochure]. https://bse.hu/newkibdata/107142/7142_1_GRA040331AR01H.pdf

Grilo, A., & Jardim-Gonçalves, R. (2010). Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Automation in Construction*, 19(5), 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.003>

Gu, N., & London, K. (2010). Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*, 19(8), 988–999. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.002>

Hasan, A. N., & Rasheed, S. M. (2019). The benefits of and challenges to implement 5D BIM in construction industry. *Civil Engineering Journal*, 5(2), 412–421. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091255>

Hatem, W. A., Abd, A. M., & Abbas, N. N. (2018). Barriers of adoption Building Information Modeling (BIM) in construction projects of Iraq. *Engineering Journal*, 22(2), 59–81. <https://doi.org/10.4186/ej.2018.22.2.59>

Howell, I., & Batcheler, B. (2011, May). Building information modeling two years later: Huge potential, some success and several limitations. *The Laiserin Letter*, 27. http://www.laiserin.com/features/bim/newforma_bim.pdf

Ibrahim, M. (2016, November 8–12). *Introduction to Building Information Modelling*. 3-Day Workshop/Annual General Meeting of the Nigerian Institute of Quantity Surveyors, Lagos, Nigeria.

IntelliCAD Technology Consortium. (n.d.). *IntelliCAD Technology Consortium*. <https://www.intellicad.org/>

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19650-1:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM): Information management*

using building information modelling. Part 1: Concepts and principles. <https://www.iso.org/standard/68078.html>

Kadefors, A. (2004). Trust in project relationships: Inside the black box. *International Journal of Project Management*, 22(3), 175–182. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(03\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(03)00031-0)

Kerosuo, H., Miettinen, R., Paavola, S., Mäki, T., & Korpela, J. (2015). Challenges of the expansive use of Building Information Modeling (BIM) in construction projects. *Production*, 25(2), 289–297. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.106512>

Kineber, A. F., Othman, I., Famakin, I. O., Oke, A. E., Hamed, M. M., & Olayemi, T. M. (2023). Challenges to the implementation of Building Information Modeling (BIM) for sustainable construction projects. *Applied Sciences*, 13(6), Article 3426. <https://doi.org/10.3390/app13063426>

Krasovskaya, O. A., Vyaznikov, V. E., & Mamaeva, A. I. (2022). Application of BIM technologies as IT projects for digital transformation in industry. In A. Gibadullin (Ed.), *Digital and information technologies in economics and management: DITEM 2021* (pp. 104–116). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97730-6_10

Ku, K., & Taiebat, M. (2011). BIM experiences and expectations: The constructors' perspective. *International Journal of Construction Education and Research*, 7(3), 175–197. <https://doi.org/10.1080/15578771.2010.544155>

Laiserin, J. (2002, December 16). Comparing pommes and naranjas. *The Laiserin Letter*, 15. <http://www.laiserin.com/features/issue15/feature01.php>

Lee, C. (2008). *BIM: Changing the AEC industry*. PMI Global Congress 2008, Denver, CO, United States. Project Management Institute.

Li, H. X., Ma, Z., Liu, H., Wang, J., Al-Hussein, M., & Mills, A. (2020). Exploring and verifying BIM-based energy simulation for building operations. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(8), 1679–1702. <https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2019-0314>

Li, J., Hou, L., Wang, X., Wang, J., Guo, J., Zhang, S., & Jiao, Y. (2014). A project-based quantification of BIM benefits. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11, Article 123. <https://doi.org/10.5772/58448>

Lindner, F., & Wald, A. (2011). Success factors of knowledge management in temporary organizations. *International Journal of Project Management*, 29(7), 877–888. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.09.003>

Lu, W., Fung, A., Peng, Y., Liang, C., & Rowlinson, S. (2014). Cost-benefit analysis of Building Information Modeling implementation in building projects through demystification of time-effort distribution curves. *Building and Environment*, 82, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.030>

Maunula, A. (2008). *The implementation of Building Information Modeling: A process perspective* (Report 23). Helsinki University of Technology, SimLab.

Maurer, I. (2010). How to build trust in inter-organizational projects: The impact of project staffing and project rewards on the formation of trust, knowledge acquisition and product innovation. *International Journal of Project Management*, 28(7), 629–637.

Mazzoli, C., Iannantuono, M., Giannakopoulos, V., Fotopoulou, A., Ferrante, A., & Garagnani, S. (2021). Building information modeling as an effective process for the sustainable re-shaping of the built environment. *Sustainability*, 13(9), Article 4658. <https://doi.org/10.3390/su13094658>

Mies, D. (2002). Managing materials data: Materials data standards. In M. Kutz (Ed.), *Handbook of materials selection* (pp. 497–498). Wiley.

Monge, G. (1798). *Géométrie descriptive: Leçons données aux Écoles normales, l'an 3 de la République*. Baudouin. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5783452x>

Nanajkar, A., & Gao, Z. (2014). BIM implementation practices at India's AEC firms. In *ICCREM 2014: Smart construction and management in the context of new technology* (pp. 134–139). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413777.016>

National Institute of Building Sciences. (n.d.). *National BIM Standard United States: Frequently asked questions*. National BIM Standard United States. <https://www.nationalbimstandard.org/faqs>

Nemetschek Group. (n.d.). *Company history*. <https://www.nemetschek.com/en/company/history>

Newton, R. (1997, March 1). Visio acquires assets of Boomerang Technology. *AECNEWS*. <http://aecnews.blogspot.com/2007/07/visio-acquires-assets-of-boomerang.html>

Nitithamyong, P., & Skibniewski, M. J. (2004). Web-based construction project management systems: How to make them successful? *Automation in Construction*, 13(4), 491–506. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.02.003>

Olanrewaju, O. I., Babarinde, S. A., & Salihu, C. (2020). Current state of Building Information Modelling in the Nigerian construction industry. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 27(2), 63–77. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.27.2.25142>

Olanrewaju, O. I., Chileshe, N., Babarinde, S. A., & Sandanayake, M. (2020). Investigating the barriers to building information modeling (BIM) implementation within the Nigerian construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(10), 2931–2958. <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2020-0042>

Olatunji, O. A. (2011). Modelling the costs of corporate implementation of Building Information Modelling. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 16(3), 211–231. <https://doi.org/10.1108/13664381111179206>

Olawumi, T. O., & Chan, D. W. M. (2019). An empirical survey of the perceived benefits of executing BIM and sustainability practices in the built environment. *Construction Innovation*, 19(3), 321–342. <https://doi.org/10.1108/CI-08-2018-0065>

Olofsson, T., Lee, G., & Eastman, C. (2008). Editorial: Case studies of BIM in use. *Journal of Information Technology in Construction*, 13, 244–245.

Open Design Alliance. (n.d.). *Formats supported by ODA's 100-year commitment*.
<https://www.opendesign.com/about/formats>

Panteli, C., Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2020). Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond. A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 265, Article 121766.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121766>

Penttilä, H. (1989). Computer aided building modeling. In *eCAADe Conference 1989: PDF proceedings* (pp. 3.2.1–3.2.11). School of Architecture in Aarhus.
<http://papers.cumincad.org/data/works/att/cf15.content.pdf>

Piroozfar, P., Farr, E. R. P., Mohammadzadeh, A., Timóteo Inácio, S., Kilgallon, S., & Jin, R. (2019). Facilitating Building Information Modelling (BIM) using Integrated Project Delivery (IPD): A UK perspective. *Journal of Building Engineering*, 26, Article 100907. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100907>

Poirier, E. A., Staub-French, S., & Forgues, D. (2015). Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action research. *Automation in Construction*, 58, 74–84.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.002>

Prendeville, S., Sanders, C., Sherry, J., & Costa, F. (2014). *Circular economy: Is it enough?* EcoDesign Centre. <http://www.edcw.org/en/resources/circulareconomy-it-enough>

Riddle, M. (n.d.). *About*. Michael Riddle's thoughts: The world of software design.
http://www.michaelriddle.com/?page_id=2

Rodrigues, F., Isayeva, A., Rodrigues, H., & Pinto, A. (2020). Energy efficiency assessment of a public building resourcing a BIM model. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5, Article 41. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00291-1>

Rokooei, S. (2015). Building Information Modeling in project management: Necessities, challenges and outcomes. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 210, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.332>

Ruffle, S. (1986). Architectural design exposed: From computer-aided drawing to computer-aided design. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 13(4), 385–389. <https://doi.org/10.1068/b130385>

Sacks, R., Eastman, C., Teicholz, P., & Liston, K. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). Wiley.

Sardroud, J. M., Mehdizadehtavasani, M., Khorramabadi, A., & Ranjbardar, A. (2018). Barriers analysis to effective implementation of BIM in the construction industry. In *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (pp. 64–71). International Association for Automation and Robotics in Construction. <https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0009>

SCIA. (n.d.). *Innovation at SCIA: History of innovations*. <https://www.scia.net/en/company/innovation-scia>

Sebastian, R. (2011). Changing roles of the clients, architects and contractors through BIM. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 18(2), 176–187. <https://doi.org/10.1108/096999811111111148>

Sepasgozar, S. M. E., Costin, A. M., Karimi, R., Shirowzhan, S., Abbasian, E., & Li, J. (2022). BIM and digital tools for state-of-the-art construction cost management. *Buildings*, 12(4), Article 396. <https://doi.org/10.3390/buildings12040396>

Serraino, P. (2002). *History of Form Z*. Birkhäuser.

Šimenić, D. (2021). *Building Information Modelling (BIM) for road infrastructure: TEM requirements and recommendations* (ECE/TRANS/308). United Nations Economic Commission for Europe. https://unece.org/sites/default/files/2021-05/2017495_E_pdf_web.pdf

Singh, T., Mahmoodian, M., & Wang, S. (2024). Enhancing open BIM interoperability: Automated generation of a structural model from an architectural model. *Buildings*, 14(8), Article 2475. <https://doi.org/10.3390/buildings14082475>

Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>

Sumbera, S. (2001). Java JMDL communication with MDL applications. *MicroStation Manager*, 11(12), 30–34. <http://www.sumbera.com/ustation/articles/JavaMDL/JavaMDL.pdf>

Takyi-Annan, G. E., & Zhang, H. (2023). A multivariate analysis of the variables impacting the level of BIM expertise of professionals in the architecture, engineering and construction industries of the developing world using nonparametric tests. *Buildings*, 13(7), Article 1606. <https://doi.org/10.3390/buildings13071606>

Trimble. (n.d.). *Company history*. https://www.trimble.com/Corporate/About_History.aspx

Ullah, K., Lill, I., & Witt, E. (2019). An overview of BIM adoption in the construction industry: Benefits and barriers. In *Proceedings of the 10th Nordic Conference on Construction Economics and Organization* (pp. 297–303). Emerald Publishing. <https://doi.org/10.1108/S2516-285320190000002052>

Van Nederveen, G. A., & Tolman, F. P. (1992). Modelling multiple views on buildings. *Automation in Construction*, 1(3), 215–224. [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(92\)90014-B](https://doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B)

van Rees, R. (2000). *ceXML: An XML vocabulary for building and civil engineering* [Master's thesis, Delft University of Technology]. <https://reinout.vanrees.org/afstudeerverslag/book1.html>

van Rees, R. (2006). *New instruments for dynamic building construction: Computer as partner in construction* [Doctoral dissertation, Delft University of Technology]. <https://reinout.vanrees.org/proefschrift.pdf>

Vidalakis, C., Abanda, F. H., & Oti, A. H. (2020). BIM adoption and implementation: Focusing on SMEs. *Construction Innovation*, 20(1), 128–147. <https://doi.org/10.1108/CI-09-2018-0076>

Vite, C., & Morbiducci, R. (2021). Optimizing the sustainable aspects of the design process through Building Information Modeling. *Sustainability*, 13(6), Article 3041. <https://doi.org/10.3390/su13063041>

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings: Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>

Wang, S., Chong, H.-Y., & Zhang, W. (2024). The impact of BIM-based integration management on megaproject performance in China. *Alexandria Engineering Journal*, 94, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.036>

Weisberg, D. E. (2008). A brief overview of the history of CAD. In *The engineering design revolution: The people, companies and computer systems that changed forever the practice of engineering* (pp. 2–19). David Weisberg. <http://cadhistory.net/02%20Brief%20Overview.pdf>

Zhang, X., Azhar, S., Nadeem, A., & Khalfan, M. (2018). Using Building Information Modelling to achieve Lean principles by improving efficiency of work teams. *International Journal of Construction Management*, 18(4), 293–300. <https://doi.org/10.1080/15623599.2017.1382083>

Ελληνική

Δερματάς, Α. (2014). *Φράγματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα*.

Νασίκα, Χ. Α., Μίχας, Σ. Ν., & Μαμάσης, Ν. (χ.χ.). *Τεχνολογίες Πληροφοριακών Μοντέλων Κατασκευών BIM και η εφαρμογή τους σε μελέτες φραγμάτων*.

Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης Α.Ε. (χ.χ.). *Φράγμα Βαλσαμιώτη*. <https://oakae.gr/portfolio-item/fragma-valsamioti/>

