



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΜΜΙΚΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΓΡΑΦΕΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Νικολιδάκη Δέσποινα

EMK ΔΕ 2023 23

Επιβλέπων: Θανόπουλος Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΜΜΙΚΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΓΡΑΦΕΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Νικολιδάκη Δέσποινα

EMK ΔΕ 2023 23

Επιβλέπων: Θανόπουλος Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

Copyright © Νικολιδάκη Δέσποινα, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Nikolidaki Despoina, 2023
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Νικολιδάκη Δέσποινα (2023)

Ανάλυση της τεχνολογίας Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών και εφαρμογή στην κατασκευή σύμμικτου κτιρίου γραφείων

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2023 23

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Nikolidaki Despoina (2023)

DiplomaThesis ΕΜΚ ΔΕ 2023 23

Analysis of Building Information Modeling technology and application to a composite office building
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Θανόπουλο Παύλο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για την άρτια καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας, καθώς και για την άμεση βοήθεια και τις συμβουλές που μου έδωσε. Ακολουθώντας, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου και προς όλους τους φίλους μου για την στήριξη που μου έδειξαν.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2023 23

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΜΜΙΚΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΓΡΑΦΕΙΩΝ

Νικολιδάκη Δέσποινα

Επιβλέπων: Θανάπουλος Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η κατανόηση της τεχνολογίας Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών και η εφαρμογή της στην διαστασιολόγηση σύμμικτου μεταλλικού κτιρίου. Αρχικά, γίνεται διερεύνηση των πλεονεκτημάτων του BIM, των δυσκολιών υιοθέτησής του καθώς και του ποσοστού χρήσης του σε διάφορες χώρες συγκριτικά με την Ελλάδα. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε ένα υφιστάμενο κτίριο γραφείων, ονομαζόμενο Zara" στην περιοχή Arteixo της Ισπανίας, και έγινε η διαστασιολόγησή του από την αρχή, εφαρμόζοντας τους κανονισμούς των Ευρωκωδίκων που ισχύουν για την Ισπανία. Ο φορέας σχεδιάστηκε αρχικά στο πρόγραμμα Revit και έπειτα πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή του στο Robot όπου δημιουργήθηκαν ομάδες μελών ανάλογα με την διατομή που τους αντιστοιχήθηκε. Γενικά, η διαστασιολόγηση υλοποιήθηκε μετά την εισαγωγή των φορέων επί της κατασκευής και αφού έγιναν όλοι οι έλεγχοι για την αντοχή του κάθε μέλους σε Ο.Κ.Α. και σε Ο.Κ.Λ., σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 3 και 4. Συγκεκριμένα, στα υποστυλώματα και στις δοκούς δόθηκε μεταλλική διατομή, ενώ οι πλάκες και οι δευτερεύουσες δοκοί σχεδιάστηκαν ως σύμμικτα στοιχεία. Κατόπιν, έγιναν οι έλεγχοι των μελών έναντι αντισεισμικού σχεδιασμού, με βάση τον Ευρωκώδικα 8, και ακολούθησε η επίλυση των συνδέσεων μεταξύ τους. Τέλος, έγινε η ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης της κατασκευής με το πρόγραμμα Revit με σκοπό να ικανοποιεί τα χαρακτηριστικά ενός "Πράσινου Κτιρίου".



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES



DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ Ε2023 23

Analysis of Building Information Modeling technology and application to a composite office building

Nikolidaki Despoina

Supervisor: Thanopoulos Pavlos, Assistant Professor NTUA

ABSTRACT

The object of the diploma thesis is the understanding of the technology of Building Information Modeling and its application to the dimensioning of a composite steel building. At first, we investigate the advantages of BIM, the difficulties of its adoption and the percentages of its use among different countries in comparison with Greece. Afterwards, an existing office building was selected, with the name "Zara" in Arteixo of Spain, and it was dimensioned from scratch while applying the Eurocode regulations for Spain. The building was initially designed in Revit and then was exported to Robot where groups of members were created according to the cross section assigned to each member. In general, the dimensioning process was implemented after the introduction of the loads and the checks for every element's resistance to ULS and SLS, according to Eurocodes 3 and 4. Particularly, the columns and the beams were designed as steel sections, while the slabs and the secondary beams were calculated as composite members. Moreover, all the members were checked against seismic design, based on Eurocode 8, and then their connections were calculated. Finally, the energy efficiency of the structure was analysed using the Revit program in order to meet the characteristics of a "Green Building".

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Γενική περιγραφή του Μοντέλου Δομικών Πληροφοριών	1
1.2	Σημασία και εξέλιξη του BIM.....	2
1.3	Πλεονεκτήματα και προβλήματα στην εφαρμογή του BIM	3
1.4	Διαστάσεις του BIM.....	7
1.5	Επίπεδα ωριμότητας.....	9
2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ.....	15
2.1	Ψηφιακό μοντέλο IFC	15
2.2	Σχέδιο Εφαρμογής BIM	18
2.3	Πρωτόκολλο COBie.....	19
2.4	Κοινό Διαδικτυακό Περιβάλλον.....	20
2.5	Ρόλοι και υποχρεώσεις κάθε προσώπου	21
2.6	Βαθμός υιοθέτησης της τεχνολογίας BIM.....	24
2.7	Η τεχνολογία BIM στην Ελλάδα	28
3	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΜΜΙΚΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	31
3.1	Περιγραφή αντικειμένου μελέτης	31
3.2	Δομικά στοιχεία μελών	33
3.2.1	Δομικός χάλυβας	33
3.2.2	Σκυρόδεμα.....	33
3.2.3	Χάλυβας οπλισμού.....	33
3.2.4	Χαλυβδύφυλλο.....	33
3.3	Προσομοίωση φορέα.....	34
3.3.1	Revit.....	34
3.3.2	Robot Structural Analysis Professional.....	35
4	ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	37
4.1	Μόνιμα Φορτία	37
4.2	Κινητά Φορτία	40
4.2.1	Επιβαλλόμενα Φορτία	40
4.2.2	Φορτίο χιονιού	42
4.2.3	Φορτίο ανέμου	45
4.2.4	Σεισμικές Δράσεις.....	61
4.3	Συνδυασμοί Δράσεων.....	66
4.3.1	Οριακή κατάσταση αστοχίας.....	66
4.3.2	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας	69
5	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.....	71
5.1	Προσδιορισμός Ανάλυσης.....	71

5.2	Διαστασιολόγηση σύμμικτης πλάκας.....	71
5.3	Διαστασιολόγηση σύμμικτων δευτερευουσών δοκών.....	76
5.4	Διαστασιολόγηση κύριων δοκών κατά Χ.....	84
5.5	Διαστασιολόγηση κύριων δοκών κατά Υ.....	89
5.6	Διαστασιολόγηση εξωτερικών υποστυλωμάτων.....	93
5.7	Διαστασιολόγηση εσωτερικών υποστυλωμάτων.....	95
6	ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	99
6.1	Γενικά.....	99
6.2	Έλεγχος μελών των πλαισίων ροπής.....	99
6.2.1	Έλεγχος επιρροής φαινομένων δεύτερης τάξης.....	99
6.2.2	Έλεγχος δοκών.....	100
6.2.3	Έλεγχος κόμβων.....	101
6.2.4	Έλεγχος υποστυλωμάτων.....	102
6.2.5	Περιορισμός βλαβών.....	105
7	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ.....	107
7.1	Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια εσωτερική δοκό κατά Χ.....	107
7.2	Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια εσωτερική δοκό κατά Υ.....	108
7.3	Σύνδεση εξωτερικού πλαισίου υποστυλώματος-δοκού.....	108
8	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ.....	111
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	123
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	125
Παράρτημα Α: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΜΙΚΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ-ΔΟΚΟΥ.....		129
A1	Έλεγχος σύμμικτης πλάκας.....	129
A2	Έλεγχος σύμμικτης δοκού.....	132
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ.....		137
B1	Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια δοκό κατά Χ.....	137
B2	Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια εσωτερική δοκό κατά Υ.....	143

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση
ΚΔΠ: Κοινό Διαδικτυακό Περιβάλλον
ΚΤΕ: Κύριος του Έργου
ΜΔΠ: Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών
ΤΕΕ: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος
AGC: Associated General Contractors
AI: Artificial Intelligence
APs: Application Protocols
AR: Augmented Reality
BC: Blockchain
BEP: BIM Execution Plan
BIM: Building Information Modeling
BIMKSM: BIM Knowledge Sharing Management
BLM: Building Lifestyle Management
CAFM: Computer Aided Facility Management
CC: Cloud Computing
CDE: Common Data Environment
CIC: Construction Industry Council
COBie: Construction Operations Building Information Exchange
CQC: Complete Quadratic Combination
DA: Data Analysis
DBB: Design Bid Build
DDP: Drawing Delivery Plan
DT: Digital Twin
EC: European Commission
EIR: Employer's Information Requirements
EUI: Energy Use Intensity
GSA: General Services Administration
GUID: Global Unique Identifier
IAI: International Alliance for Interoperability
IDM: Information Delivery Manual
IGES: Initial Graphics Exchange Specification
IFC: Industry Foundation Classes
IFD: Information Framework Dictionary
IoT: Internet of Things
IPD: Integrated Project Delivery
JFCC: Japan Federation of Construction Contractors
LEED: Leadership in Energy and Environmental Design

LOD: Level of Development/Level of Definition
LoD: Level of Detail
LOI: Level of Information
LS: Laser Scanning
MIDP: Master Information Delivery Plan
ML: Machine Learning
MR: Mixed Reality
MVD: Model View Definitions
NBIMS: National Building Information Modeling Standard
PLM: Product Lifestyle Management
SBM: Single Building Model
SLS: Serviceability Limit States
ULS: Ultimate Limit States
UPM: Unified Project Management
VDC: Virtual Design and Construction
VT: Virtual Reality

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική περιγραφή του Μοντέλου Δομικών Πληροφοριών

Η ψηφιοποίηση των δεδομένων έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό στις περισσότερες χώρες του κόσμου. Η τεχνολογία αυτή έχει επηρεάσει αρκετούς κλάδους, με βασικότερο αυτό της βιομηχανίας, έχοντας οδηγήσει στην ραγδαία αύξηση της παραγωγικότητας, της ποιότητας και της ποικιλίας των προϊόντων. Στον κατασκευαστικό κλάδο έχει πλέον καθιερωθεί η αξιοποίηση των ψηφιακών εργαλείων κατά τη φάση σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας ενός κτιρίου.

Ωστόσο, η διαδικασία ψηφιοποίησης των πληροφοριών δεν είναι πάντα άρτια και πολλές φορές οδηγεί σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Αρχικά, μεγάλο μέρος των δεδομένων ενός έργου χάνεται κατά τη διαδικασία παράδοσής του, καθώς κατά την ροή των πληροφοριών υπάρχουν αρκετές ελλείψεις και σφάλματα. Ένα επιπρόσθετο πρόβλημα είναι ότι οι αλλαγές ως προς το σχεδιασμό είναι αρκετά χρονοβόρες, δεδομένου ότι τα τεχνικά σχέδια πρέπει να ελεγχθούν χειροκίνητα. Επίσης, σε περίπτωση αλλαγών τα διαφορετικά ψηφιακά αρχεία δεν ενημερώνονται αυτόματα, αλλά απαιτούν την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα. Έτσι, είναι πιθανό να προκύψουν προβλήματα τα οποία θα αργήσουν να γίνουν αντιληπτά, προκαλώντας ακόμα περαιτέρω καθυστερήσεις και αυξήσεις του κόστους για την εύρεση πιθανών λύσεων. Τέλος, το εύρος πληροφοριών που διαθέτουν τα τεχνικά σχέδια είναι περιορισμένο, με αποτέλεσμα ο μηχανικός να καταβάλει περαιτέρω προσπάθεια για να μπορέσει να αξιοποιήσει τα δεδομένα σχεδιασμού ενός έργου για διαφορετικό είδος ανάλυσης, υπολογισμού ή προσομοίωσης. Σε κάθε περίπτωση, μεγάλος αριθμός στοιχείων που κάποτε ήταν ψηφιακά χάνονται και πρέπει να δημιουργηθούν από την αρχή.

Η τεχνολογία Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών ή απλώς BIM δημιουργήθηκε ώστε να αποφεύγονται παρόμοιες καταστάσεις. Με την εξελιγμένη τεχνολογία που παρέχει ένα Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών, οι πληροφορίες μεταφέρονται πιο εύκολα χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος να χαθούν δεδομένα. Συγκεκριμένα, το BIM αντί να καταγράφει τις πληροφορίες σε μορφή σχεδίων, τις αποθηκεύει, τις κατηγοριοποιεί και τις μεταφέρει από την μία πηγή στην άλλη δημιουργώντας έτσι πιο ολοκληρωμένα και άρτια ψηφιακά μοντέλα πληροφοριών του έργου. Επιτυγχάνεται, λοιπόν, ο συντονισμός των διαδικασιών σχεδιασμού, προσομοίωσης, αλλά και ο έλεγχος κατασκευής του έργου από τον διαχειριστή. Τελικά, μέσω της ψηφιοποίησης των δεδομένων περιορίζονται τα λάθη που προκύπτουν εξαιτίας της χειροκίνητης μεταφοράς τους, ενώ παράλληλα αυξάνεται η παραγωγικότητα και η ποιότητα των κατασκευαστικών έργων.

1.2 Σημασία και εξέλιξη του BIM

Η τεχνολογία BIM δεν έχει έναν σταθερό ορισμό, αλλά διάφορες εννοιολογικές σημασίες που αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Η έννοια BIM χρονολογείται από το 1980 με τη εμφάνισή του στα πρώτα σχεδιαστικά προγράμματα CAD. Οι ερευνητές εκείνης της εποχής χαρακτήριζαν το BIM ως την τρισδιάστατη ψηφιακή απεικόνιση ενός κτιρίου εμπλουτισμένο με επιπλέον πληροφορίες για τα φυσικά, τεχνικά και λειτουργικά στοιχεία του έργου. Μάλιστα, ήδη από το 1970 είχαν δημοσιευθεί έρευνες οι οποίες σαν αντικείμενό τους είχαν τη δυνατότητα εικονικής απεικόνισης μοντέλων (C. Eastman 1974).

Ο πιο σύγχρονος ορισμός του BIM εμφανίζεται στα τέλη του 1990 και αρχές του 2000 με τη χρήση των μοντέλων SBM (Single Building Model) από διάφορα λογισμικά CAD, όπως το *Revit*, το *Graphisoft* και το *Bentley*. Πλέον το BIM αποτελεί την τεχνολογία μοντελοποίησης των πληροφοριών και δημιουργίας έξυπνων αντικειμένων στον κατασκευαστικό τομέα, καθιστώντας εξαιρετικά σημαντική την υιοθέτησή του. Ειδικότερα, ο όρος BIM πρωτοεμφανίστηκε το 1992 από τους ερευνητές *Nederveen* και *Tolman*. Ωστόσο, η ευρεία διάδοση του όρου ξεκίνησε από την εταιρεία λογισμικού *Autodesk*, η οποία τον χρησιμοποίησε σε μία έρευνα δημοσιευμένη το 2003.

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιήθηκε η διεύρυνση της τρισδιάστατης διάστασης (3D) του μοντέλου, διαμορφώνοντας με αυτόν τον τρόπο την 4^η, 5^η, 6^η και 7^η διάσταση του BIM που αναπτύσσονται στη βάση του PLM (Product Lifestyle Management). Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως BLM (Building Lifestyle Management), ή αλλιώς UPM (Unified Project Management) και επιτρέπει περαιτέρω χρήση πληροφοριών υψηλής χωρητικότητας που είναι αποθηκευμένες στο τρισδιάστατο μοντέλο της κατασκευής.

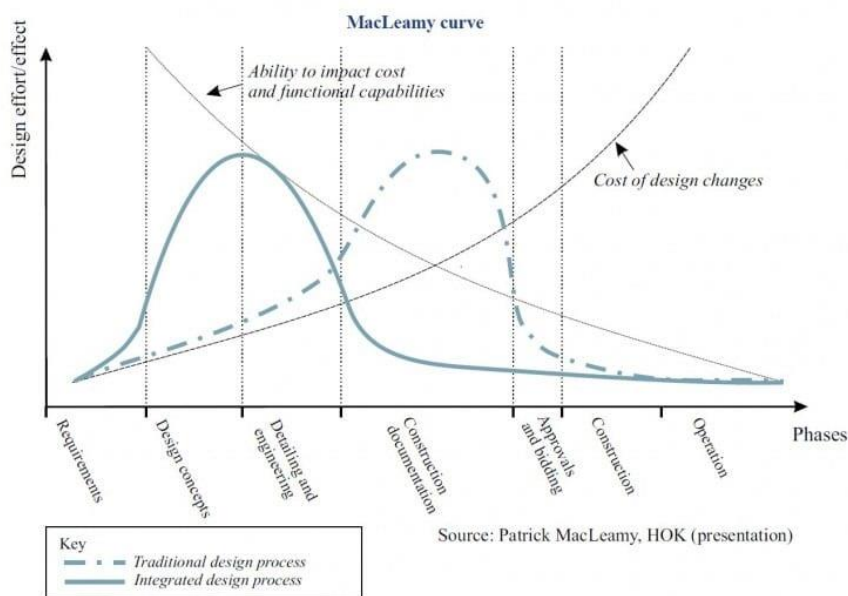
Η σημασία της εφαρμογής της τεχνολογίας Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών φαίνεται από την πληθώρα των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση του. Συγκεκριμένα, το BIM έχει σαν στόχο την ακριβή γεωμετρική αναπαράσταση των δεδομένων που απαιτούνται για τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός τρισδιάστατου CAD, καθιστώντας δυνατή την αλλαγή αυτών των δεδομένων σε οποιοδήποτε στάδιο της κατασκευής και διευκολύνοντας την πρόσβαση, τη μεταφορά και την αναβάθμιση των πληροφοριών στο περιβάλλον του. Οι μηχανικοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη γνώση που αποκτήθηκε μέσω αυτών των πληροφοριών σε μελλοντικές κατασκευές και να κατανοήσουν βαθύτερα την ευρύτερη διαδικασία ψηφιοποίησης δεδομένων. Ακόμη, οι διαχειριστές ενός έργου και οι μηχανικοί ενός εργοταξίου έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν τις πιο πρόσφατες κοινοποιημένες πληροφορίες κατά τη φάση κατασκευής του έργου και να ενημερώνονται γρήγορα για τυχόν θέματα που προκύπτουν, ώστε να βρίσκουν μία άμεση και έξυπνη λύση. Ευνοείται, λοιπόν, η συνεργασία μεταξύ διαφορετικών μελών του έργου στις διάφορες φάσεις του. Σε πολλές χώρες έχει αντικατασταθεί η έννοια του BIM από τον όρο *Virtual Design and Construction* (VDC), ο οποίος αφορά την ηλεκτρονική αποτύπωση της εικόνας μιας κατασκευής.

Σε οποιοδήποτε μοντέλο γνώσης που βασίζεται στην τεχνολογία BIM μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα πληροφορίες και να αποφευχθούν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν πριν την κατασκευή του έργου. Οι πιο πρόσφατες πληροφορίες και γνώσεις μοιράζονται από τους μηχανικούς και στη συνέχεια αποθηκεύονται ως αντικείμενα του μοντέλου BIM για μελλοντική αναφορά. Το μοντέλο περιλαμβάνει μεταβλητές που μπορούν να μετατραπούν σε έξυπνα αντικείμενα BIM και να αποθηκεύσουν την αναγνωρισμένη γνώση.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, το BIM αποτελεί την τεχνολογία με την οποία:

- αναπτύσσεται η στρατηγική σχεδιασμού, κατασκευής και διαχείρισης των εγκαταστάσεων κτιριακών έργων μέσω τεχνολογιών ψηφιακής μοντελοποίησης και προσομοίωσης
- διασφαλίζεται η διαχείριση ροής δεδομένων και πληροφοριών μέσα στο περιβάλλον του ενσωματωμένου λογισμικού
- τα μεμονωμένα στοιχεία ομαδοποιούνται και οι μεμονωμένες εργασίες ενσωματώνονται στις διαδικασίες επίλυσης σύνθετων προβλημάτων

- πραγματοποιείται ταχύτερη, αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη εκτέλεση του συνόλου των εργασιών ενός κατασκευαστικού έργου.



Σχήμα 1-1: Καμπύλη MacLeamy, <https://biblus.accasoftware.com/en/the-advantages-of-bim/>

Με το πέρασμα των χρόνων έχουν διαμορφωθεί διάφοροι εναλλακτικοί ορισμοί για την έννοια του BIM:

- ✓ Η τεχνολογία BIM (Building Information Modeling) αποτελεί την διαδικασία συγκέντρωσης, επεξεργασίας, διαχείρισης και ανταλλαγής των πληροφοριών ενός έργου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του με τυποποιημένο τρόπο.
- ✓ Η τεχνολογία BIM είναι μία ολοκληρωμένη διαδικασία που βασίζεται σε αξιόπιστες πληροφορίες οι οποίες είναι διαθέσιμες από το στάδιο σχεδιασμού έως την κατασκευή και τη λειτουργία ενός έργου.
- ✓ Ένα Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών χαρακτηρίζεται ως η γραφική απεικόνιση των δεδομένων ενός έργου που συνδέει τα αντικείμενα του μοντέλου BIM και τα οποία είναι άμεσα διαθέσιμα προς όλα τα συνεργαζόμενα μέλη του έργου.
- ✓ Ένα Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών συνιστά τη μετατροπή του συνόλου των χαρακτηριστικών ενός έργου σε ψηφιακή μορφή και καθιστά εύκολη την επικοινωνία των συμβαλλόμενων μελών του έργου.
- ✓ Ένα Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών αποτελεί ένα ψηφιακό περιβάλλον στο οποίο περιέχονται όλες οι πληροφορίες μιας κατασκευής ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν με εύκολο τρόπο ή ακόμα και να τροποποιηθούν για τη σωστή συνεργασία και λήψη αποφάσεων.
- ✓ Ένα Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών είναι ένα ψηφιακό αρχείο ανοιχτού τύπου για την ανάγνωση και μελέτη μιας κτιριακής μονάδας.

1.3 Πλεονεκτήματα και προβλήματα στην εφαρμογή του BIM

Το Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών απλοποιεί τις διαδικασίες εκμετάλλευσης και βέλτιστης διαχείρισης μιας κατασκευής χάρη στην πληθώρα πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση του. Αρχικά, επιτρέπει στους μηχανικούς να προεκτιμήσουν την αποδοτικότητα ενός έργου πριν την κατασκευή του και να πραγματοποιήσουν οποιαδήποτε αλλαγή γρήγορα και αποτελεσματικά, χωρίς να επιβραδυνθεί η δουλειά των συνεργαζόμενων μελών. Παράλληλα, προωθεί την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μέσω της ανάλυσης, της προσομοίωσης και της ψηφιακής οπτικοποίησής του με την υψηλότερη ποιότητα.

Επιπρόσθετα, οι διάφορες ομάδες του έργου μπορούν να εξαγάγουν δεδομένα από το μοντέλο για να τα αναλύσουν και να τα τροποποιήσουν κατάλληλα με σκοπό την οικονομικότερη παράδοση του έργου. Οι

Πολιτικοί Μηχανικοί από την πλευρά τους μπορούν να αξιοποιήσουν το μοντέλο πληροφοριών για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας, της κατασκευασιμότητας, της βιωσιμότητας και της ασφάλειας της κατασκευής. Ο χρόνος για την εξέταση περισσότερων εναλλακτικών λύσεων και την εκτέλεση μετατροπών στον σχεδιασμό μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την καλύτερη πρόβλεψη και τον προγραμματισμό των χρονοδιαγραμμάτων του έργου.

Σε αντίθεση με τη απλή δισδιάστατη (2D) σχεδίαση, ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του BIM είναι ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά παράγονται απευθείας από το μοντέλο χωρίς να υπόκεινται σε αλλαγές κι έτσι μπορούν να ανιχνευτούν ευκολότερα πιθανές διαφορές μεταξύ των σχεδιαστικών κλάδων ακόμα και σε πρώιμο στάδιο. Με άλλα λόγια, όλα τα αποθηκευμένα αρχεία επικοινωνούν μεταξύ τους και ενημερώνονται το ένα από το άλλο όταν πραγματοποιούνται μετατροπές. Χάρη σε αυτό τον συντονισμό των εγγράφων, καθώς και στην άρτια ψηφιακή αποτύπωση του μοντέλου, επιτυγχάνεται ένας έξυπνος και πληροφοριακός διαδικτυακός τόπος ο οποίος συνεισφέρει στην σημαντικά μειωμένη σπατάλη των πόρων. Όσον αφορά τη γεωμετρία της κατασκευής, με την κατηγοριοποίηση των πληροφοριών απλοποιούνται σημαντικά οι υπολογισμοί του μοντέλου. Τέλος, η τεχνολογία BIM βοηθά στον έλεγχο τήρησης των κανονιστικών διατάξεων και στον ευκολότερο υπολογισμό του κόστους του έργου.

Επομένως, το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας BIM είναι ότι κάθε μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερες από μία φορές για διαφορετικές αναλύσεις και προσομοιώσεις. Σήμερα, τα εξελιγμένα προϊόντα λογισμικού αποτελούν τη βάση για την υλοποίηση ενός έργου BIM και βοηθούν στη διόρθωση λανθασμένων σχεδιασμών ή υπολογισμών.



Σχήμα 1-2: Οι χρήσεις του BIM, <https://www.lodplanner.com/what-is-bim/>

Αναλυτικότερα, παρακάτω αναπτύσσονται τα συνολικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η εφαρμογή του BIM σε όλες τις φάσεις ζωής ενός έργου.

Κατά τη φάση σχεδιασμού:

- Καλύτερη επίβλεψη της σκοπιμότητας της κατασκευής για την πραγματοποίησης της ιδέας.
- Λεπτομερέστερη ανάλυση της τοποθεσίας του έργου και επιλογή της βέλτιστης θέσης λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις,
- Πιο αποτελεσματική σχεδίαση της κατασκευής με ακρίβεια και ευκολότερη διόρθωση σε περίπτωση εύρεσης κάποιου λάθους, χωρίς να επηρεάζονται τα υπόλοιπα σχέδια.
- Εναλλακτικές προτάσεις σχεδιασμού μέχρι να βρεθεί ο πιο βιώσιμος σχεδιασμός.
- Σχεδιασμός του έργου έχοντας ως όραμα την μέγιστη ενεργειακή απόδοση

- Συνολική εποπτεία του μοντέλου και αποφυγή σφαλμάτων ή συγκρούσεων κατά την επικοινωνία των μηχανικών.
- Πιο γρήγορη και ακριβής υπολογισμός του συνολικού κόστους.

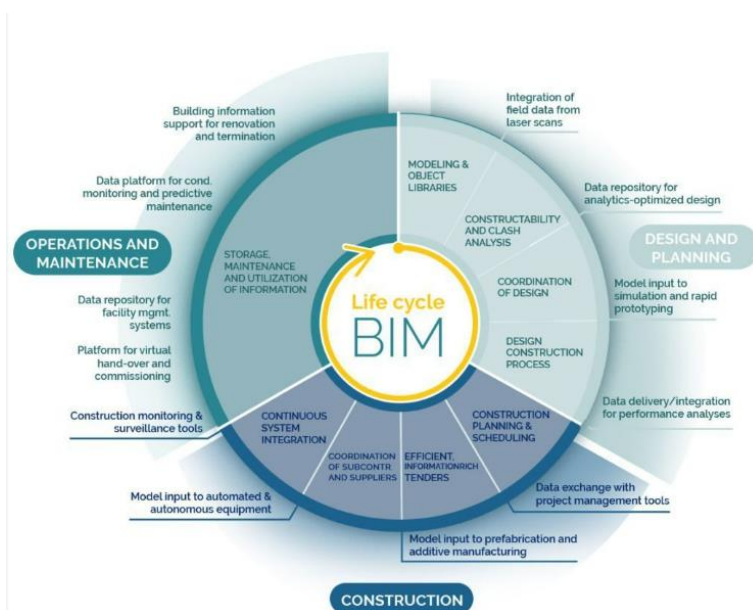
Κατά την κατασκευή:

- Δυνατότητα αξιολόγησης των συνθηκών των σύνθετων κτιριακών εγκαταστάσεων για την πρόταση άλλων λύσεων με σκοπό τον βέλτιστο σχεδιασμό.
- Καλύτερη εύρεση, εκμετάλλευση και αποθήκευση των διαθέσιμων πόρων του έργου.
- Κατασκευή πολλαπλών δομικών μελών της κατασκευής, τα οποία βρίσκονται εκτός οπτικής γωνίας, με τη βοήθεια του σχεδιαστικού μοντέλου.
- Καλύτερη διαχείριση και εκμετάλλευση του χώρου
- Αποφυγή περιπτώσεων συμφόρησης στο χώρο και εξασφάλιση των καλύτερων συνθηκών για την ασφάλεια των εργαζομένων.

Κατά τη λειτουργία:

- Το αποθηκευμένο αρχείο του μοντέλου συνεισφέρει στην λήψη των κατάλληλων αποφάσεων για τη συντήρηση, τη λειτουργία, την επισκευή ή την αντικατάσταση ορισμένων δομικών στοιχείων.
- Παρέχει μεγαλύτερη και ακριβέστερη πληροφόρηση σχετικά με την εκμετάλλευση των οικονομικότερων στοιχείων.
- Εύκολος προγραμματισμός των διαδικασιών συντήρησης της κατασκευής, αλλά και άμεση πρόσβαση στις σχετικές πληροφορίες.

Σε επίπεδο κτιρίου, με την εφαρμογή του BIM εξάγονται ακριβή αποτελέσματα με σκοπό την εξοικονόμηση πόρων, δηλαδή τον βέλτιστο σχεδιασμό της κατασκευής σύμφωνα με τον «πράσινο σχεδιασμό». Συνεπώς, καθίσταται εφικτή η διαρκής παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, μία διαδικασία που βοηθά στην καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων και τελικά στην αποτελεσματικότερη επιλογή των εργαλείων.



Σχήμα 1-3: Η τεχνολογία BIM κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, <https://www.cemexventures.com/discover-how-bim-is-implemented-in-each-phase-of-the-construction-industry/>

Στην μακροκλίμακα, σε επίπεδο υλοποίησης μιας πόλης, η τεχνολογία BIM συντελεί στην καλύτερη λειτουργία των αστικών περιοχών. Αυτό συμβαίνει καθώς ένα ΜΔΠ μπορεί να εκτιμήσει την αξιοπιστία του συνόλου των δομικών χαρακτηριστικών όλων των κτιρίων, όπως το ύψος της κατασκευής, την αρχιτεκτονική, τα οικοδομικά υλικά, τον χρόνο ολοκλήρωσης του έργου κλπ. Ως επακόλουθο, πραγματοποιείται η αξιολόγηση κάθε κτιριακής μονάδας, ενώ παράλληλα μειώνεται ο απαιτούμενος χρόνος για τον αναλυτικό πολεοδομικό σχεδιασμό. Σε ποικίλες περιπτώσεις, μάλιστα, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, απαιτούνται συγκεκριμένες παρεμβάσεις, όπως αύξηση των επιφανειών πρασίνου, φυτευτές ταράτσες, χρήση υλικών που εξασφαλίζουν την βιοκλιματική ανάπτυξη της κάθε πόλης.

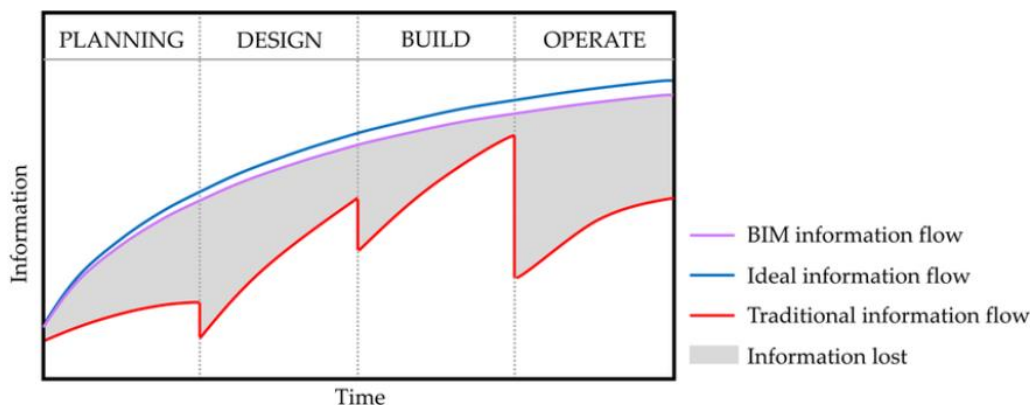
Παρά τις θετικές πτυχές, όμως, που παρέχει ένα Μοντέλο Δομικών Πληροφοριών, δεν είναι πάντα εύκολη η δημιουργία ενός άρτιου μοντέλου και η εφαρμογή των σωστών εργαλείων που εξασφαλίζουν μία αποδοτική ροή των διαδικασιών. Έτσι, ενώ στην πλειοψηφία η τεχνολογία BIM παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα, δεν αποκλείονται ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι δυσχεραίνουν την εφαρμογή της. Το 2007 η συμβολαιογραφική εταιρεία των ΗΠΑ Associated General Contractors (AGC) προώθησε τον Συμβολαιογραφικό Οδηγό AGC σύμφωνα με το BIM. Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων της στηρίχθηκε στη γνώμη που διατύπωσαν διάφοροι εργολάβοι κατά τη χρήση της τεχνολογίας. Τρία (3) χρόνια αργότερα, το 2010 ο Οδηγός ανανεώθηκε με νέες πληροφορίες αναφορικά με την ένταξη του BIM στην ονομαζόμενη εταιρεία AECOO και με την εμφάνιση νέων τύπων λογισμικού για την μοντελοποίηση μιας κατασκευής. Η δημοσίευση του Οδηγού στόχευε στην ενημέρωση και την εξοικείωση των εργαζόμενων με τη χρήση του BIM. Επίσης, προοριζόταν για να αναλύσει την ευθύνη που πρέπει να αναλάβει το κάθε συνεργαζόμενο μέλος της ομάδας και τις οδηγίες που πρέπει να ακολουθηθούν σε περίπτωση εμφάνισης κινδύνων.

Αρκετοί, λοιπόν, ερευνητές μελέτησαν τους παράγοντες που εμποδίζουν τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός έργου με τη χρήση του BIM σε ποικίλες χώρες. Αρχικά, οι Elmualim και Gilder το 2014 επικεντρώθηκαν στη χώρα των ΗΠΑ, τον Καναδά, το Ηνωμένο Βασίλειο, την Γκάνα, την Νότια Αφρική, την Κίνα, την Ινδία και τέλος την Αυστραλία. Οι βασικότερες αιτίες για την μειωμένη χρήση του BIM συνοψίζονται στο περιορισμένο διαθέσιμο κεφάλαιο για την εφαρμογή του ΜΔΠ, το μικρό ενδιαφέρον και την άγνοια των πλεονεκτημάτων που δείχνουν πολλοί εργολάβοι με την εφαρμογή του και την μεγάλη ευθύνη που φέρει ο Διαχειριστής του έργου. Αντίστοιχα, η εταιρεία Enterprise της Ιρλανδίας αναφέρει ως βασικότερο τροχοπέδη την έλλειψη τεχνογνωσίας των μηχανικών με την πλατφόρμα του BIM, την μικρή εμπειρία τους στην εφαρμογή του.

Το 2016, ο Hosseini ανέλυσε τους λόγους περιορισμένης υιοθέτησης του BIM στην Αυστραλία και στην Νέα Ζηλανδία. Όσον αφορά την πρώτη χώρα, οι βασικότεροι λόγοι είναι η μειωμένη γνώση και ενημέρωση που παρέχεται τόσο στους υπεργολάβους όσο και στους πελάτες του έργου και το μεγάλο κόστος που απαιτεί το BIM για την υλοποίησή του. Όσον αφορά τη δεύτερη, εμπόδια αποτελούν το υψηλό αρχικό κόστος και η γενικότερη αντίθεση που εκφράζουν οι πολιτικές αρχές.

Το 2017, ο Ismail εξέτασε την μειωμένη εφαρμογή του BIM στην Κίνα, την Ινδία, το Πακιστάν, τη Σρι Λάνκα, την Μαλαισία, την Ταϊλάνδη και το Βιετνάμ. Στις χώρες αυτές βασικό εμπόδιο αποτελούν οι αρχές της τεχνολογίας ΜΔΠ που έρχονται σε σύγκρουση με τους ισχύοντες πολιτικούς κανόνες, τα μεγάλα ποσά που πρέπει να καταβληθούν για την επένδυση σε νέες τεχνολογίες, η μειωμένη ζήτηση και η αβεβαιότητα της απόδοσης που επιφέρει ένα μοντέλο BIM.

Όλα τα παραπάνω δείχνουν ότι η υιοθέτηση της τεχνολογίας BIM δυσχεραίνεται σε μεγάλη κλίμακα και μόνο συγκεκριμένα τμήματά της μπορούν να εφαρμοστούν από τους μηχανικούς που διαθέτουν τις κατάλληλες γνώσεις επί του αντικειμένου. Παρά αυτές τις δυσκολίες, οι διαδικασίες ολοκληρωμένης παράδοσης έργου (*Integrated Project Delivery-IPD*) βοηθούν στη διαμόρφωση ενός καλύτερου περιβάλλοντος για την εφαρμογή του BIM. Το IPD μέσω της χρήσης BIM αυξάνει την προστιθέμενη αξία και εξασφαλίζει υψηλότερο όφελος στον πελάτη του έργου.



Σχήμα 1-4: Η ροή πληροφοριών σε όλα τα στάδια ενός έργου, <https://www.lodplanner.com/what-is-bim/>

1.4 Διαστάσεις του BIM

Το μοντέλο BIM χωρίζεται σε πέντε (5) διαστάσεις οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

Επίπεδο 0: Στην πραγματικότητα δεν αποτελεί μοντέλο BIM, καθώς χρησιμοποιεί διασπασμένα αρχεία CAD (2D) για το σχεδιασμό και την παραγωγή πληροφορίας.

Επίπεδο 1: Απεικονίζει ένα έργο σε τρισδιάστατη μορφή (3D) και είναι γνωστό και ως μοναδικό BIM (lonely BIM). Στο επίπεδο αυτό μπορούν να συνυπάρχουν πολλά διαφορετικά σχέδια μιας κατασκευής χωρίς, όμως, να επικοινωνούν ή να συνεργάζονται μεταξύ τους. Αντιθέτως, το κάθε αρχείο αποτελεί ένα μεμονωμένο μοντέλο το οποίο λειτουργεί μόνο του χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες δομές και μορφές δεδομένων. Υπάρχει, ακόμη, η δυνατότητα να περιέχονται στο αρχείο ορισμένα δεδομένα κοστολόγησης τα οποία δεν ενσωματώνονται στο τελικό μοντέλο BIM.

Επίπεδο 2: Σε αυτό το επίπεδο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα οφέλη που μας προσφέρει η τεχνολογία BIM. Τα αρχεία αποθηκεύονται σε ξεχωριστά λογισμικά συνεργαζόμενα με το BIM για εύκολη επεξεργασία των δεδομένων τους. Σημαντική είναι και η εμφάνιση της έννοιας COBie (Construction Operations Building Information Exchange), μίας βάσης που επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών και τη κοινοποίησή τους. Τέλος, μπορεί να περιέχονται δεδομένα που αφορούν το κόστος του έργου.

Επίπεδο 3: Χαρακτηρίζεται ως το πλήρες συνεργαζόμενο μοντέλο BIM στο οποίο χρησιμοποιούνται διαδικτυακές υπηρεσίες που εξυπηρετούν την ομαλή λειτουργία της τεχνολογίας. Τα αρχεία που δημιουργούνται λειτουργούν σύμφωνα με το μοντέλο IFC (Industry Foundation Classes). Επίσης, είναι αναγκαία η εξασφάλιση της διαλειτουργικότητας του λογισμικού σε αυτό το επίπεδο, ώστε το BIM να αντιμετωπίσει οποιαδήποτε εμπόδια ή προβλήματα. Τα μοντέλα BIM που δημιουργούνται εξασφαλίζουν την αλληλουχία των στοιχείων και προσδιορίζουν το κόστος της κατασκευής και γενικά τον κύκλο ζωής της.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 1-5: Μέθοδοι τρισδιάστατης αποτύπωσης με (α) Drones, (β) Lidar, (γ) GPS Robotics, (δ) Laser scanning και (ε) Handheld laser scanning, <https://www.united-bim.com/ultimate-guide-of-scan-to-bim/>

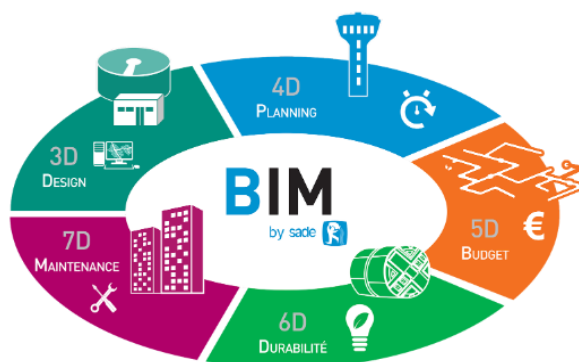
Επίπεδο 4: Η τέταρτη (4^η) διάσταση του BIM αφορά τον χρονικό προγραμματισμό και την απεικόνιση της κατασκευής. Οι πληροφορίες που παρέχονται από τον προσδιορισμό του χρόνου δείχνουν την εξάρτηση που υπάρχει ανάμεσα στις ακολουθίες του μοντέλου. Πολλές φορές στις πληροφορίες αναφέρεται και ο μηχανολογικός εξοπλισμός, όπως οι γερανοί, τα φορτηγά.

Επίπεδο 5: Η πέμπτη (5^η) διάσταση του BIM αναφέρεται στην προμέτρηση κάθε ποσότητας που θα χρησιμοποιηθεί και στον υπολογισμό του συνολικού κόστους του τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου.

Επίπεδο 6: Στην έκτη (6^η) διάσταση του BIM αναφέρεται ο ενεργειακός και αειφόρος σχεδιασμός και η ανάλυση της κατασκευής.

Επίπεδο 7: Τέλος, η έβδομη (7^η) διάσταση του BIM αναλύει τις εφαρμογές που αναπτύσσονται για την υποστήριξη της λειτουργίας και της συντήρησης του έργου.

Σύμφωνα με ορισμένους μελετητές, η έκτη (6^η) και έβδομη (7^η) διάσταση της τεχνολογίας BIM δεν αποτελούν στην πραγματικότητα μέρος των «εικονικών» διαστάσεων της και για αυτό το λόγο δεν τις ορίζουν. Οι περισσότερες σύγχρονες κατασκευές που είναι συνυφασμένες με την τεχνολογία BIM ανήκουν συνήθως στο επίπεδο 0, 1 ή 2.



Σχήμα 1-6: Οι διαστάσεις του BIM, <https://www.sade-cqth.fr/en/blog/innovation-en/do-you-know-bim/>

1.5 Επίπεδα ωριμότητας

Η ομάδα εργασιών του Ηνωμένου Βασιλείου ανέλυσε την τεχνολογία Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών σε τέσσερα (4) επιμέρους διακριτά επίπεδα, με σκοπό να αναπτύξει μία πιο κατάλληλη προσέγγιση του συνόλου των διαδικασιών. Τα επίπεδα ωριμότητας δείχνουν στην πράξη τον βαθμό στον οποίο έχει εξελιχθεί η τεχνολογία BIM τόσο ως προς τα τεχνολογικά μέσα που απαιτούνται για τον σχεδιασμό όσο και ως προς τη βάση δεδομένων για την αποθήκευση και την ανταλλαγή των πληροφοριών. Συγκεκριμένα, τα επίπεδα ωριμότητας του BIM είναι τα παρακάτω:

Επίπεδο ωριμότητας 0: Στο επίπεδο αυτό περιγράφεται η ανάλυση δισδιάστατων (2D) σχεδίων με τη χρήση σχεδιαστικών προγραμμάτων CAD και η ανταλλαγή αυτών μέσω της σχεδίασής τους σε χαρτί. Η τεχνολογία αναπτύχθηκε το 1990 και χρησιμοποιούσε ως πρότυπα τα *BS1192:2007* και *BS7000:4*.

Επίπεδο ωριμότητας 1: Περιλαμβάνει τρισδιάστατα (3D) σχέδια που έχουν δημιουργηθεί από Ηλεκτρονικό Υπολογιστή, συνήθως με πιο περίπλοκη γεωμετρική διάταξη, ενώ συνεχίζουν να υπάρχουν σχέδια σε δισδιάστατη (2D) μορφή. Η ανταλλαγή των αρχείων πραγματοποιείται μέσω της αποστολής μεμονωμένων αρχείων με τη χρήση Η/Υ. Το επίπεδο ωριμότητας 1 ξεκίνησε να αναπτύσσεται από το 2000 και είχε ως πρότυπα τα *BS1192:2007*, *BS7000:4* και *BS8541:2* τα οποία αργότερα εξελίχθηκαν σε: *BS EN ISO 19650-1*.

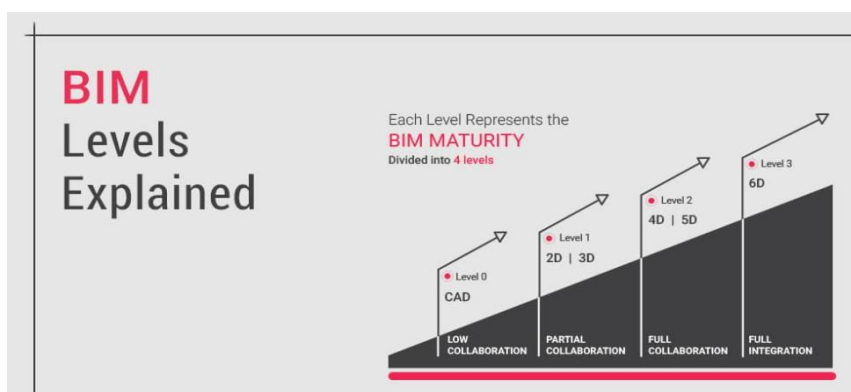
Επίπεδο ωριμότητας 2: Πλέον για τις μελέτες χρησιμοποιείται η τεχνολογία BIM με κατάλληλα λογισμικά για τον ψηφιακό σχεδιασμό των μοντέλων. Κάθε εμπλεκόμενος τομέας, όμως, χρησιμοποιεί ξεχωριστά μοντέλα BIM. Η συσχέτιση και η συνοχή τους εξασφαλίζεται με τον έλεγχο των επιμέρους υπομοντέλων, ώστε να μην υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ τους. Η ανταλλαγή δεδομένων πραγματοποιείται με βάση τα ξεχωριστά αποθηκευμένα σε Η/Υ αρχεία (IFC) τα οποία στη συνέχεια μετατρέπονται σε ένα ενιαίο μοντέλο. Οι πληροφορίες αποθηκεύονται, επίσης, σε βιβλιοθήκες αντικειμένων BIM σε ένα ενιαίο σύστημα ταξινόμησης. Τα πρότυπα στα οποία βασίζεται αυτό το επίπεδο ωριμότητας είναι τα *BS1192:2*, *BS1192:3* και *BS8541:1:3:4* τα οποία αργότερα μετατράπηκαν σε *BSENISO 19650-2*, *-3*. Το επίπεδο

ωριμότητας 2 εμφανίστηκε το 2010 και δείχνει στην ουσία τα συμβαλλόμενα πρόσωπα, τον ακριβή χρόνο και τον τρόπο παράδοσης του έργου. Η βρετανική κυβέρνηση επέβαλε ως υποχρεωτική τη χρήση του επιπέδου αυτού για όλα τα κοινά κατασκευαστικά έργα από τον Απρίλιο του 2016 (Γραφείο Υπουργικού Συμβουλίου 2011). Βασίζεται στις εξής προδιαγραφές:

- PAS1192-2:2013: διαχείριση του κεφαλαίου και τελική παράδοση του έργου με τη ψηφιακή μοντελοποίηση της κατασκευής.
- PAS1192-3:2014: διαχείριση των πληροφοριών κατά τη φάση λειτουργίας με τη ψηφιακή μοντελοποίηση της κατασκευής.

Οι νομικές συμβάσεις καθορίζονται από το πρωτόκολλο BIM και το Ψηφιακό Σχέδιο Εργασίας (*PAS1992-2:2013*) ορίζει ποιες πληροφορίες πρέπει να περιέχονται στη κάθε φάση του έργου.

Επίπεδο ωριμότητας 3: Αναπτύχθηκε από το 2020 και βασίζεται στη χρήση ενός πλήρους αναπτυγμένου μοντέλου BIM. Δηλαδή, για όλη τη διάρκεια της ζωής του έργου αναπτύσσεται ένα ενιαίο κοινό τρισδιάστατο (3D) μοντέλο BIM. Η ανταλλαγή των δεδομένων γίνεται μέσω των προτύπων *ISO* και η διαχείρισή τους μέσω υπηρεσιών *Cloud*. Χαρακτηριστικό σε αυτό το επίπεδο ωριμότητας είναι ότι όλα τα αρχεία ρυθμίζονται σε μία κεντρική πλατφόρμα που ονομάζεται Κοινό Διαδικτυακό Περιβάλλον (Common Data Environment - CDE). Ένα CDE είναι υπεύθυνο για την κατάσταση του αρχείου, τις μετατροπές που χρειάζονται σε αυτό και την πρόσβαση στις πληροφορίες. Σημαντικό ρόλο παίζει το πρότυπο COBie για τη διευκόλυνση της παράδοσης των πληροφοριών στη φάση λειτουργίας της κατασκευής. Τα πρότυπα στα οποία βασίζονταν το επίπεδο ωριμότητας 3 ήταν τα IFC (Industry Foundation Classes), IDM (Information Delivery Manual) και IFD (Information Framework Dictionary), τα οποία τώρα μετατράπηκαν σε *EN ISO 16739-1*.



Σχήμα 1-7: Τα επίπεδα ωριμότητας του BIM, <https://www.united-bim.com/bim-maturity-levels-explained-level-0-1-2-3/>

Στο επίπεδο ωριμότητας 0 δεν έχουμε συνεργασία των αρχείων, στο επίπεδο 1 έχουμε μερική συνεργασία, ενώ στο επίπεδο 2 έχουμε πλήρη συνεργασία και στο επίπεδο 3 πλήρη διαδικτυακή συνεργασία. Ακόμη, όσον αφορά τις διαστάσεις του BIM, στο επίπεδο ωριμότητας 0 αναπτύσσονται μόνο δισδιάστατα (2D) σχέδια, στον επίπεδο 1 δισδιάστατα (2D) και τρισδιάστατα (3D) σχέδια, το επίπεδο 2 αφορά στοιχεία χρόνου (4D), κόστους (5D) και συντήρησης (7D), ενώ στο επίπεδο 3 προστίθενται και στοιχεία αειφόρου σχεδιασμού (6D).

Ένα ώριμο μοντέλο BIM πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένες απαιτήσεις ώστε να είναι αξιόπιστο και να λειτουργεί σύμφωνα με τα πρότυπα. Συγκεκριμένα θα ορίσουμε παρακάτω τις απαιτήσεις που πρέπει να πληροί το μοντέλο BIM:

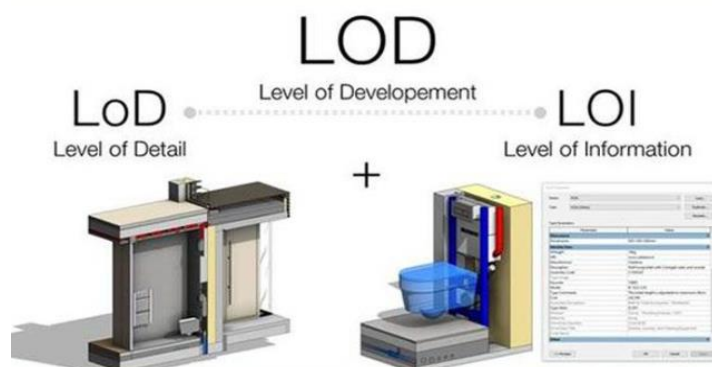
1. Η πλατφόρμα πρέπει να επιτρέπει την διαλειτουργικότητα και τη συμβατότητα των αρχείων για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η ανταλλαγή των δεδομένων. Όλες οι πληροφορίες πρέπει να αποθηκεύονται σε αρχεία IFC και να υποστηρίζουν την εφαρμογή του προτύπου COBie. Ακόμη, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί η αποθήκευση των αρχείων και η κοινοποίησή τους σε ένα σύστημα Cloud.

2. Το λογισμικό πρέπει να είναι απλό και λειτουργικό για να είναι εύκολο και κατανοητό στη χρήση του.
3. Είναι απαραίτητο τα αποτελέσματα των υπολογισμών να είναι ορθά. Για αυτό, είναι σημαντικό τα εργαλεία του λογισμικού να παρέχουν ακριβή δεδομένα.
4. Παράλληλα, σημαντική είναι και η δυνατότητα επέκτασης του λογισμικού, δηλαδή να προσφέρει την επιλογή συνεργασίας με άλλα λογισμικά κατασκευαστών.
5. Τα μοντέλα και τα εργαλεία BIM πρέπει να λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να προωθούν το έργο εξοικονόμησης ενέργειας σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου, καθώς σε παγκόσμιο επίπεδο οι κυβερνήσεις προσπαθούν να επιβάλουν την μείωση εκπομπών άνθρακα.
6. Ο σχεδιασμός πρέπει να γίνεται με στόχο την σωστή διαχείριση χρόνου και την αποφυγή συγκρούσεων πριν την έναρξη της κατασκευής του έργου.
7. Το λογισμικό είναι αναγκαίο να αποθηκεύει τα δεδομένα κατευθείαν στο μοντέλο και να λειτουργεί με ακρίβεια για τον υπολογισμό του κόστους.
8. Τέλος, οι κτιριακές εγκαταστάσεις πρέπει να διαχειρίζονται με συγκεκριμένο τρόπο, αξιοποιώντας όλα τα δεδομένα από το λογισμικό BIM. Έτσι, εξασφαλίζεται η σωστή συντήρησή τους και η αποφυγή απροσδόκητων προβλημάτων.

Υπάρχουν διάφορα λογισμικά που λειτουργούν σύμφωνα με την τεχνολογία BIM. Τα κυριότερα από αυτά είναι: *Autodesk Revit*, *Graphisoft*, *ArchiCAD*, *Tekla Structures*, *Nemetschek Allplan*, *Nemetschek Vector works*, *BricsCAD*, *Edificius*.

Ένα μοντέλο BIM καθορίζεται από μία συνεχή σειρά εργασιών που αναπτύσσονται σταδιακά. Κάθε μοντέλο που αποθηκεύεται σε ένα από τα παραπάνω λογισμικά, έχει διαφορετικό βαθμό λεπτομέρειας και πληροφορίας στα σχέδια. Ο όρος LOD (Level of Development ή αλλιώς Level of Definition) δείχνει ακριβώς την ποσότητα των πληροφοριών που περιέχει ένα μοντέλο BIM, δηλαδή το επίπεδο στο οποίο έχει αναπτυχθεί η πληροφορία που περιέχει (LOI - Level of Information). Ειδικότερα, αξίζει να σημειωθεί ότι η έννοια LoD αφορά την κλίμακα γεωμετρικής απεικόνισης, ενώ ο όρος LOI αναφέρεται στην κλίμακα περιγραφικής, υπολογιστικής και οικονομικής απεικόνισης.

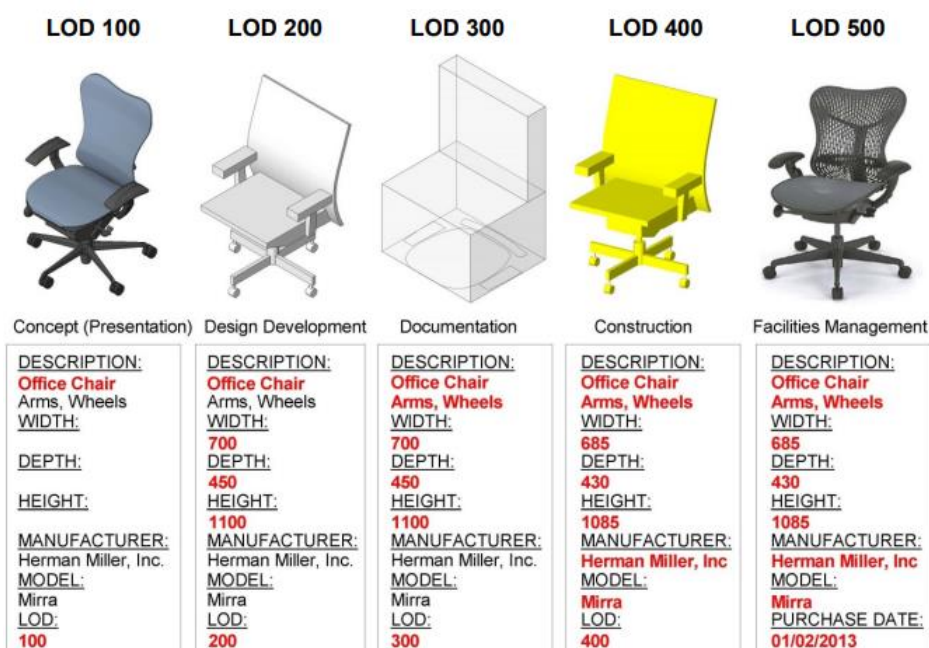
Συχνά ο όρος Level of Detail συγχέεται με τον όρο Level of Development. Η βασική τους διαφορά έγκειται στο ότι ο πρώτος όρος δείχνει πόση λεπτομέρεια περιέχει το μοντέλο, σε αντίθεση με τον δεύτερο που δείχνει τον βαθμό στον οποίο η γεωμετρία των στοιχείων μαζί με τις σχετικές πληροφορίες έχουν διαμορφωθεί.



Σχήμα 1-8: Οι διαφορετικές έννοιες: LoD, LOD και LOI, <https://evolve-consultancy.com/lod-lod-loi/>

Χάρη στο LOD μειώνονται τα προβλήματα ελλιπούς πληροφορίας. Αρχικά, χρησιμοποιούταν ο όρος LoD (Level of Detail) δίνοντας περισσότερο έμφαση στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Αντιθέτως, το LOD έχει πιο ευρεία έννοια, καθώς αναφέρεται στις γεωμετρικές και στις αλφαριθμητικές πληροφορίες και δείχνει το επίπεδο ωριμότητας και αξιοπιστίας του. Ταυτόχρονα, με τη χρήση μοντέλων διαστάσεων 4D και 5D ενισχύεται η αποτελεσματική συνεργασία, η εμπιστοσύνη, η διαφάνεια και επικοινωνία μεταξύ των μηχανικών του έργου. Ο χρονικός προσδιορισμός στον οποίο οφείλει ο κάθε μηχανικός να παραδώσει τη δουλειά του είναι γνωστός με τον όρο Drawing Delivery Plan (DDP).

Το LOD δεν προσφέρει τον ίδιο βαθμό πληροφόρησης για τη γεωμετρία ή τις ιδιότητες ενός έργου. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο μπορεί να έχει σχεδιαστεί με ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ενώ οι ιδιότητές του να μην έχουν αναλυθεί εξίσου. Σε αυτό το παράδειγμα, το μοντέλο BIM θα διέθετε υψηλό επίπεδο γεωμετρικής ανάλυσης, αλλά χαμηλό επίπεδο ανάλυσης ιδιοτήτων.



Σχήμα 1-9: Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ανάλογα με το επίπεδο ανάπτυξης ενός μοντέλου, <https://enphy.wordpress.com/2018/05/08/bim-lod-levels-of-development-simplified/>

Τα επίπεδα ανάπτυξης ενός ΜΔΠ έχουν καθοριστεί με διαφορετικό τρόπο στην Μεγάλη Βρετανία και στις ΗΠΑ και είναι τα εξής:

Πίνακας 1-1: Τα επίπεδα ανάπτυξης στη Μ. Βρετανία και στις ΗΠΑ

Μ. Βρετανία	ΗΠΑ	Περιγραφή	Ονομασία
1	-	Φάκελος έργου	LOD 1
2	LOD 100	Προμελέτη	LOD 2/100
3	LOD 200	Οριστική Μελέτη	LOD 3/200
4	LOD 300	Μελέτη Εφαρμογής	LOD 4/300
5	LOD 400	Εγκατάσταση-Κατασκευή	LOD 5/400
6	LOD 500	Όπως κατασκευάστηκε	LOD 6/500
7	-	Σε Λειτουργία	LOD 7

Συγκεκριμένα, κάθε επίπεδο LOD είναι υπεύθυνο για ορισμένες λειτουργίες:

LOD 1: Προγραμματική απεικόνιση

LOD 2/100: Σχηματική απεικόνιση

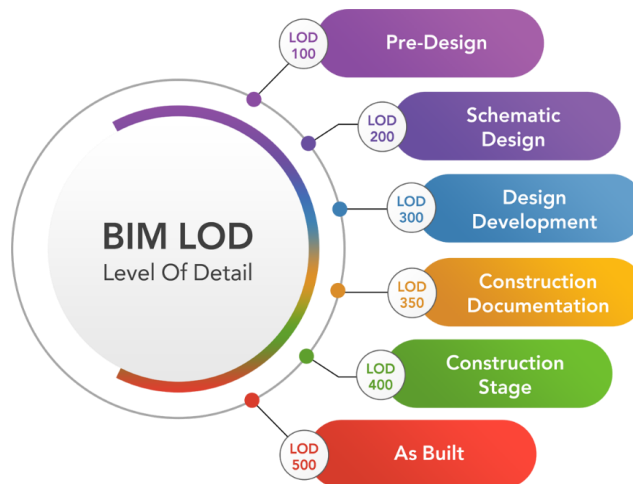
LOD 3/200: Γεωμετρική απεικόνιση

LOD 4/300: Τεχνική απεικόνιση

LOD 5/400: Κατασκευαστική απεικόνιση

LOD 6/500: Απεικόνιση όπως κατασκευάστηκε

LOD 7: Λειτουργική απεικόνιση



Σχήμα 1-10: Το επίπεδο λεπτομέρειας ενός μοντέλου BIM, <https://www.bim-lead.com/services/bim-lod/>

Γενικότερα, η έννοια LOD δείχνει την σταδιακή πρόοδο και εξέλιξη ενός αρχικά δισδιάστατου (2D) μοντέλου, με το χαμηλότερο επίπεδο LOD, σε ένα τρισδιάστατο (3D) μοντέλο στο οποίο περιλαμβάνονται αναλυτικά όλες οι γραφικές και μη γραφικές πληροφορίες. Όσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο του LOD τόσο μεγαλύτερη λεπτομέρεια υπάρχει στο μοντέλο. Ωστόσο, η επίτευξη υψηλού επιπέδου LOD δεν είναι επιθυμητή σε όλες τις περιπτώσεις, εξαιτίας της σημαντικής αύξησης του μεγέθους του αρχείου με άμεση συνέπεια την αργή λειτουργία της τεχνολογίας BIM. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα του υψηλού επιπέδου LOD είναι ότι, σε αντίθεση με τα χαμηλότερα επίπεδα τα οποία περιλαμβάνουν ένα γενικό μοντέλο αρχείων, αυτό απαιτεί πολλά ξεχωριστά αρχεία για κάθε ομάδα πληροφοριών. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι στην περίπτωση που ο μηχανικός επιθυμεί να κάνει κάποιες αλλαγές στα σχέδια, θα πρέπει να αλλάξει κάθε αρχείο, μία αρκετά χρονοβόρα διαδικασία.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, λοιπόν, πριν επιλεγεί το επίπεδο LOD είναι σημαντικό να ερευνηθεί αρχικά ο σκοπός για τον οποίο κατασκευάζεται ένα μοντέλο και έπειτα να προσαρμόσουμε το κατάλληλο LOD. Για τη λειτουργία και τη συντήρηση της κατασκευής θα ήταν περισσότερο επιθυμητό ένα χαμηλό επίπεδο LOD, ενώ για την μελέτη και ανάλυση απαιτητικών αρχιτεκτονικών σχεδίων θα κρινόταν καταλληλότερο ένα υψηλό επίπεδο LOD.

Διακρίνονται τρία διαφορετικά στάδια για τον προσχεδιασμό μιας κατασκευής:

Προκαταρκτικό στάδιο:

Ο σχεδιασμός γίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πελάτη και μέσω της ποιοτικής και λειτουργικής αξιολόγησης των διαδικασιών, καθορίζεται το συνολικό μορφολογικό πλαίσιο του κτιρίου. δεδομένα.

Οριστικό στάδιο:

Τα σχέδια κρίνονται από τις Αρχές προκειμένου να εγκριθούν τελικά και να χορηγηθούν οι απαιτούμενες άδειες. Σε αυτό το επίπεδο, επιλέγεται μία οικονομική θέση για το έργο.

Εκτελεστικό στάδιο:

Η κατασκευαστική εταιρεία είναι αρμόδια για τον έλεγχο και την έγκριση των σχεδίων και καθορίζει τις απαιτούμενες ενέργειες που πρέπει να γίνουν για τη πλήρη οργάνωση του συνόλου των εργασιών.

Σκοπός είναι η δημιουργία ενός Μοντέλου Πληροφοριών Εργοταξίου Κατασκευής πριν και κατά την διάρκεια της εκτέλεσης του έργου, ώστε τελικά να επιλυθούν οποιαδήποτε ζητήματα ανακύψουν στο εργοτάξιο και να επιτευχθεί ο βέλτιστος δυνατός σχεδιασμός της κατασκευής.

Φάση κατασκευής έργου:

Η χρήση της τεχνολογίας BIM είναι χρήσιμη για το σχεδιασμό ενός έργου, αλλά και για την κατασκευή του. Οι εργολάβοι του έργου έχουν μία καλύτερη εικόνα του κόστους του έργου για να ετοιμάσουν την καλύτερη προσφορά, έχοντας μία γενική εικόνα και του κόστους του έργου σε μεταγενέστερο επίπεδο με τη βοήθεια της πέμπτης διάστασης (5D) του μοντέλου BIM. Επίσης, η τέταρτη διάσταση (4D) του μοντέλου, που σχετίζεται με τον χρονικό προγραμματισμό, βοηθά σημαντικά στην καλύτερη οργάνωση και στην αποφυγή εμφάνισης προβλημάτων. Τέλος, οι μέθοδοι BIM συνεισφέρουν στην κοστολόγηση και προμέτρηση των εργασιών και στην καλύτερη διαχείριση πιθανών λαθών.

Φάση λειτουργίας έργου:

Η τεχνολογία BIM επιφέρει πολλά πλεονεκτήματα και μετά την κατασκευή, κατά τη φάση λειτουργίας του έργου. Σημαντική, όμως, προϋπόθεση είναι το ψηφιακό μοντέλο να έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τα πρότυπα, να περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες του έργου από τη φάση κατασκευής και όλες οι πληροφορίες και τα δεδομένα να είναι οργανωμένα κατά το σχεδιασμό του σε ένα λογισμικό BIM. Αν ο ιδιοκτήτης του έργου παραλαμβάνει ψηφιακά δεδομένα υψηλής ανάλυσης και όχι απλώς γραφικά σχέδια, έχει τη δυνατότητα να τα ενσωματώσει άμεσα στα υπολογιστικά του συστήματα, χωρίς να χρειάζεται να τα εισάγει χειροκίνητα. Κατά τη φάση λειτουργίας του έργου είναι απαραίτητες οι πληροφορίες σχετικές με τα εγκαταστημένα συστήματα και τους όρους εγγύησης και συντήρησης. Ακόμη, κάθε αλλαγή που πραγματοποιείται στην πραγματική κατασκευή πρέπει να υλοποιείται και στο ψηφιακό της δίδυμο. Αντίστοιχα, όταν με το πέρασμα του χρόνου απαιτούνται μεγαλύτερες τροποποιήσεις, το μοντέλο του κτιρίου είναι σε θέση να αναδείξει τις απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες που πρέπει να γίνουν. Σε περίπτωση που το κτίριο χρειάζεται να κατεδαφιστεί, το ψηφιακό δίδυμο παρέχει την κατάλληλη ενημέρωση για τα υλικά που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, τα οποία να μπορούν να ανακυκλωθούν ή να απορριφθούν χωρίς να προκαλέσουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

2.1 Ψηφιακό μοντέλο IFC

Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα, το 2004 το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογιών των ΗΠΑ αποκάλυψε ότι το ελλιπές διαλειτουργικό λογισμικό στη διαχείριση των κεφαλαίων προκαλεί μία σημαντική δαπάνη που ανέρχεται στα 15.8 δισεκατομμύρια δολάρια κάθε χρόνο. Προκειμένου, λοιπόν, να περιοριστεί αυτό το τεράστιο και επιζήμιο κόστος και να αναβαθμιστεί η διαδικασία ανταλλαγής δεδομένων, συντάχθηκε μία Διεθνής Συμμαχία Διαλειτουργικότητας στον κλάδο της βιομηχανίας AEC η οποία έλαβε την ονομασία *Building Smart*.

Το ψηφιακό μοντέλο που κατασκευάστηκε είναι γνωστό με την ονομασία IFC και προσφέρει πληροφορίες και στοιχεία σε όλη τη διάρκεια ζωής ενός έργου. Από το 2013 γίνεται πολύ εύκολα η ανταλλαγή των δεδομένων μέσω του προτύπου ISO το οποίο υιοθετήθηκε σε εθνικό επίπεδο και αποτέλεσε στο σύνολό του την εφαρμογή γνωστή ως *Open BIM*. Τα μοντέλα IFC, επομένως, αποτελούν μία σημαντική εξέλιξη στον κατασκευαστικό κλάδο, με την πιθανότητα, όμως, να υπάρχουν ακόμη κάποια εκτοπίσματα. Δηλαδή, είναι δυνατόν να παρουσιαστεί ελλιπής μεταφορά δεδομένων, ή παρερμηνεία κάποιων εννοιών. Παρόλο που οι διαδικασίες ανταλλαγής δεδομένων αποτελούν μία αρκετά δύσκολη τεχνικά εφαρμογή, οι τεχνικοί του λογισμικού μπορούν να ξεπεράσουν αυτά τα προβλήματα θέτοντας τους σωστούς στόχους και έχοντας συνειδητοποιήσει ότι το *Open BIM* αποτελεί τον κολοσσό των λογισμικών σε αυτόν τον τομέα.



Σχήμα 2-1: Το πρότυπο ISO 16739, <https://biblus.accasoftware.com/en/what-is-the-iso-16739-standard/>

Η τεχνολογία BIM βασίζεται στην εφαρμογή ενός ενιαίου ολοκληρωμένου ψηφιακού μοντέλου που αποτελεί τη βάση για την ανταλλαγή των δεδομένων. Κατά αυτό τον τρόπο, αυτοματοποιείται η διαδικασία εισόδου των πληροφοριών στο σύστημα και καταργείται πλέον η χειροκίνητη εισαγωγή τους και κατά συνέπεια μειώνονται τυχόν συχνά ανθρώπινα σφάλματα. Χάρη στο ΜΔΠ, ακόμη, διευκολύνεται η επικοινωνία μεταξύ των μηχανικών του έργου, καθώς και η άμεση αποστολή των αρχείων στους εργολάβους και στον πελάτη του έργου στο τέλος της κατασκευής του.

Ανάλογα με το είδος της εργασίας που πρέπει να πραγματοποιηθεί, υπάρχει το αντίστοιχο λογισμικό. Για παράδειγμα, υπάρχουν διαφορετικές πλατφόρμες για τον γεωμετρικό σχεδιασμό, για τη δομική και τη στατική μελέτη, για τις απαιτήσεις θέρμανσης ή κλιματισμού. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα της συνύπαρξης πολλών λογισμικών είναι η δυσκολία ανταλλαγής διαφορετικών δεδομένων με άμεση συνέπεια να απαιτείται η μεταφορά τους από το ένα στο άλλο από κάποιο συμβαλλόμενο πρόσωπο, μία διαδικασία αρκετά επιρρεπής σε ανθρώπινα λάθη. Έτσι, λοιπόν, κρίνεται αναγκαία η ομοιομορφία των στοιχείων και η σαφήνειά τους, ώστε να μειώνονται οι πιθανότητες σφάλματος. Σε περίπτωση που οι πληροφορίες των στοιχείων διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους, μία άμεση λύση είναι η αναλυτική περιγραφή των σχέσεων που τα συνδέουν και των ιδιοτήτων τους.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί η σημασία του όρου της διαλειτουργικότητας, καθώς χάρη σε αυτή καθίσταται δυνατή η μεταφορά των δεδομένων μεταξύ ποικίλων προμηθευτών χωρίς να χάνεται κανένα από τα στοιχεία τους.

Αρκετοί είναι οι λόγοι που δυσχεραίνουν τη σωστή ανταλλαγή των πληροφοριών:

- Περισσότερες από μία εταιρείες αναλαμβάνουν το σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου.
- Κάθε έργο αποτελείται από πολλές φάσεις, καθεμία από τις οποίες αναλαμβάνεται από διαφορετικό τεχνικό γραφείο.
- Σε κάθε εταιρεία συμβάλλουν πολλές διαφορετικές ειδικότητες μηχανικών.
- Το 93% των κατασκευαστικών εταιρειών στην Ευρώπη ανήκουν στις μικρομεσαίες επιχειρήσεις με λιγότερους από δέκα υπαλλήλους.
- Συχνά η επικοινωνία μεταξύ των εταιρειών δεν είναι αποδοτική, καθώς δεν καθορίζονται πλήρως οι ευθύνες και τα καθήκοντα που θα αναλάβει ο καθένας.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, συμπεραίνουμε πως ο κατασκευαστικός κλάδος αποτελείται από πολλές διαφορετικές εταιρείες και ανεξάρτητους φορείς. Εξαιτίας της διαφορετικής προσέγγισης και της χρήσης διαφορετικών υλικών, γίνεται ακόμα πιο δύσκολη η εφαρμογή ενιαίων προτύπων. Επιπρόσθετα, οι δημόσιες αρχές είναι υποχρεωμένες να μην παρουσιάζουν στον πωλητή τα προϊόντα λογισμικού που θα χρησιμοποιήσουν κατά την προσφορά τους. Οι πελάτες από την πλευρά τους, πρέπει να δρουν αυτοβούλως και να μην προσκολλώνται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις του κάθε προμηθευτή. Προκειμένου να αποφευχθούν μελλοντικές παρανοήσεις ανάμεσα στα συμβαλλόμενα πρόσωπα, έχουν καθορισθεί συγκεκριμένα πρότυπα ανταλλαγής πληροφοριών για να υπάρχει ένας μικρός βαθμός προβλεψιμότητας ως προς τα δεδομένα, δηλαδή μία τυποποιημένη μορφή διαλειτουργικότητας (συνήθως για 2D σχέδια).

Είναι σύνηθες τα πρότυπα στα οποία βασίζονται οι διάφορες μορφές των δεδομένων να μην καλύπτουν όλα τα σενάρια ανταλλαγής τους στο πλαίσιο BIM, ούτε τη λεπτομέρεια των πληροφοριών που περιέχουν, για αυτό κρίθηκε απαραίτητη μία τυποποιημένη διαδικασία για τη μεταφορά τους, σύμφωνα με το όραμα *Big BIM*. Μακροπρόθεσμα, όμως, η εφαρμογή αυτή στην πράξη δεν είναι εύκολη. Στόχος του *Building Smart* είναι να ορίσει τα πρότυπα IFC ως μία ανοιχτή διαδικασία, ώστε ακόμα και σε περιπτώσεις πολυσύνθετων εννοιών να είναι ευκρινής η απεικόνιση των πληροφοριών τους τόσο σε γεωμετρικό όσο και σε σημασιολογικό επίπεδο. Με αυτή την τακτική είναι δυνατή η ανταλλαγή των

στοιχείων μεταξύ οποιουδήποτε λογισμικού και σε οποιαδήποτε φάση του έργου. Σε διεθνές πλέον επίπεδο, το πρότυπο IFC αποτελεί την αφετηρία για την τυποποίηση των πληροφοριών κατά την εφαρμογή του BIM.

Το πρότυπο IFC έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου με στόχο την βέλτιστη εφαρμογή του. Η τελευταία έκδοσή του είναι η τέταρτη (4^η) η οποία αν και έχει αναπτυχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση, αλλά μόνο όταν οι πωλητές έχουν ενσωματώσει την κάθε διαφορετική πλατφόρμα στη διεπαφή εισαγωγής και εξαγωγής. Έχουν σημειωθεί αρκετές απώλειες κατά την μεταφορά των δεδομένων όταν το σύστημα εισαγωγής και εξαγωγής δεν λειτουργεί σωστά. Αυτό πολλές φορές, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα του μοντέλου, καθιστά αμφισβητήσιμη την υιοθέτηση αρχείων IFC. Η πολυπλοκότητα του μοντέλου διαφαίνεται στους ποικίλους τρόπους αποτύπωσης μιας τρισδιάστατης (3D) γεωμετρίας, γεγονός που απαιτεί να υποστηρίζονται όλες οι δυνατότητες γεωμετρικής αναπαράστασης από το λογισμικό για να είναι συμβατή με το αρχείο IFC. Για την αποφυγή αυτή της χρονοβόρας διαδικασίας, το *Building Smart* καθιέρωσε το *Model View Definitions* (MVD), το οποίο επιτρέπει την εφαρμογή ορισμένου τύπου ανταλλαγής των δεδομένων.

Η πρώτη προσπάθεια για την δημιουργία ενός περιβάλλοντος κατάλληλου για την βέλτιστη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών αρχείων CAD έγινε το 1970. Κάποια από αυτά εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται και σήμερα, όπως το *Initial Graphics Exchange Specification* (IGES), το οποίο αναφέρεται κυρίως στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Οι προσπάθειες, όμως, για την αναβάθμιση και την καλύτερη απόδοση του περιβάλλοντος συνεχίστηκαν. Το 1980 εμφανίστηκε το πρότυπο *Step* το οποίο χρησίμευε στην μεταφορά συγκεκριμένων προϊόντων του μοντέλου. Στη συνέχεια, η Τεχνική Επιτροπή 184, Υποεπιτροπή 4 (ISO TC 184/SC 4) που ανήκε στον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), προώθησε την σύμπτυξη μιας ενότητας αρχών σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10303, στο οποίο συμμετείχαν διάφοροι βιομηχανικοί κλάδοι. Στο ISO 10303-11 κυριαρχούσε ένα ενιαίο πλαίσιο για την απεικόνιση ενός μοντέλου. Άλλα πρότυπα που στηρίζονταν στη βάση 10303 στόχευαν και στην γραφική αναπαράσταση μεμονωμένων προϊόντων σε διαφορετικά αρχεία τα οποία συνεργάζονταν διαλειτουργικά για την αποτελεσματική επεξεργασία των πληροφοριών. Η ομαδοποίησή τους για την αποτελεσματική ανταλλαγή των δεδομένων πραγματοποιούνταν μέσω των Πρωτόκολλων Εφαρμογής (*Application Protocols - APs*).

Παρά την προσπάθεια υιοθέτησης ενός κοινού συστήματος μοντελοποίησης, οι γραφειοκρατικές διαδικασίες αποτελούσαν τροχοπέδη στην γρήγορα ανάπτυξη και εξέλιξη του προτύπου ISO. Συνεπώς, ομάδες μηχανικών από διαφορετικές κατασκευαστικές εταιρείες και κατασκευαστών λογισμικών (όπως η *Autodesk*) επιχείρησαν να συμπράξουν το 1995 στα πλαίσια της Διεθνούς Συμμαχίας για Διαλειτουργικότητα (*International Alliance for Interoperability - IAI*) για την επίτευξη της τυποποιημένης διαδικασίας. Ο οργανισμός που συγκρότησαν αυτές οι ομάδες ονομάστηκε το 2005 ως *Building Smart*, στον οποίο έλαβαν μέρος πάνω από 800 εταιρείες. Το πρώτο πρότυπο που δημοσιεύτηκε το 1997 έλαβε την ονομασία *Industry Foundation Classes*.

Ακολούθως, δημοσιεύτηκαν και άλλα πρότυπα βασισμένα στο IFC με μικρές τροποποιήσεις, τα οποία ήταν διαθέσιμα χωρίς κάποια οικονομική επιβάρυνση. Σε αντίθεση με άλλα μοντέλα αντικειμένων, μορφές αρχείων όπως είναι τα *DWG* ή *ARX* της *Autodesk* δεν δίνουν την άδεια χρήσης του μοντέλου IFC. Κατά συνέπεια, η πλειοψηφία των λογισμικών αναγκάστηκε να υιοθετήσει το μοντέλο IFC. Σήμερα, πάνω από 160 διαφορετικά λογισμικά υποστηρίζουν το πρότυπο IFC. Μετέπειτα, η ένταξη του IFC στο ISO 16739 πραγματοποιήθηκε το 2013 και σε πολλές χώρες θεωρείται πλέον υποχρεωτική αυτή η μορφή αρχείων για την ανταλλαγή δεδομένων. Με άλλα λόγια, το πρότυπο IFC αποτελεί τη βάση για την εφαρμογή του *Open BIM* και έχει ενσωματωθεί σε μεγάλο αριθμό λογισμικών BIM.

Με τη βοήθεια του ανοιχτού πλαισίου της δομής του, το IFC χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την τεχνολογία ΜΔΠ για την κατασκευή δημόσιων έργων. Μεγάλα άλματα ανάπτυξης σε αυτόν τον τομέα

έχουν γίνει σε πολλές χώρες του εξωτερικού, όπως στη Σιγκαπούρη, τη Φιλανδία, τη Νορβηγία, την Αγγλία, τις ΗΠΑ. Η ανοιχτή δομή των αρχείων εξασφαλίζει ότι θα μπορούν να είναι προσβάσιμα για επεξεργασία για αρκετά χρόνια, δεδομένου ότι η διάρκεια ζωής ενός κτιριακού έργου αντιστοιχεί σε μερικές δεκάδες χρόνια.

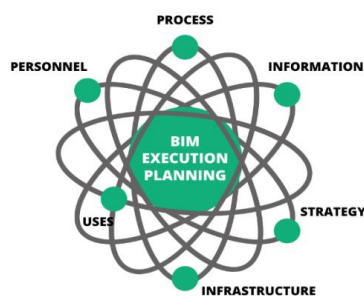
2.2 Σχέδιο Εφαρμογής BIM

Η σωστή υλοποίηση του BIM προϋποθέτει την ικανοποίηση των νομικών απαιτήσεων που αναφέρονται στο περιεχόμενο του μοντέλου. Το σύνολο των απαιτήσεων αυτών ορίζεται από την υπογραφόμενη σύμβαση, μέσα στην οποία αναφέρονται αναλυτικά οι όροι και οι ευθύνες του αρμόδιου φορέα. Το Συμβούλιο της Βρετανικής Κατασκευαστικής Βιομηχανίας (British Construction Industry Council - CIC) εξέδωσε το πρωτόκολλο BIM το οποίο λειτουργεί σύμφωνα με τις παραπάνω απαιτήσεις και υπογράφηκε το 2013.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να οριστούν κάποιες βασικές έννοιες που αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της εφαρμογής ενός ΜΔΠ. Αρχικά, οι απαιτήσεις του εργοδότη του έργου αποτελούν μία έννοια γνωστή με τον όρο *Employer's Information Requirements* (EIR). Ακολούθως, ορίζεται το σχέδιο εκτέλεσης για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του εργοδότη, το οποίο ονομάζεται BIM Execution Plan (BEP). Και οι δύο έννοιες είναι εξαιρετικά σημαντικές για την υλοποίηση ενός ψηφιακού μοντέλου BIM και αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της σύμβασης. Ουσιαστικά, το EIR αποτελεί το τμήμα του έργου στο οποίο ο πελάτης εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο θα εκτελεστούν οι ψηφιακές εργασίες για να πραγματοποιηθεί ο αρχικός του στόχος. Επιπρόσθετα, σε αυτό αναγράφονται οι αρμοδιότητες και οι ευθύνες του κάθε προσώπου, το χρονικό περιθώριο μέσα στο οποίο πρέπει να εκτελεστούν και να παραδοθούν οι διεργασίες και τον τρόπο ανταλλαγής των πληροφοριών. Το περιεχόμενο και οι λεπτομέρειες που περιέχονται στο ψηφιακό μοντέλο ορίζονται με βάση το LOD.

Το BEP καθορίζεται πριν την ανάθεση του έργου και περιγράφει όλες τις απαιτήσεις του EIR των αναδόχων. Μετά την ανάθεση, το BEP συμπεριλαμβάνεται σε ένα πιο λεπτομερές έγγραφο και πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένα πρότυπα που έχουν καθιερωθεί. Ένα τέτοιο πρότυπο είναι το PAS 1192-2:2013 της Μ. Βρετανίας σύμφωνα με το οποίο λειτουργεί το ISO 19650, αν και ακόμα δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως.

Τα αντικείμενα που περιέχονται μέσα σε ένα μοντέλο BIM ονομάζονται έξυπνα αντικείμενα BIM. Τα αντικείμενα αυτά παρέχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά και την απόδοση των στοιχείων. Τέτοια αντικείμενα είναι: οι πόρτες, τα παράθυρα, ο συναγερμός ή ο ανιχνευτής πυρκαγιάς. Σύμφωνα με έρευνες, τα έξυπνα αντικείμενα BIM αποθηκεύονται σε IFC αρχεία τα οποία συμφωνούν με το πρότυπο COBie. Αναλυτικότερα, το πρότυπο COBie αποτελείται από ένα σύνολο δεδομένων τα οποία χαρακτηρίζονται ως Model View Definition (MVD) και καθορίζουν τα μοντέλα IFC. Το IFC είναι εξαιρετικά χρήσιμο για την βέλτιστη οργάνωση, διαχείριση και ανταλλαγή των πληροφοριακών δεδομένων που αποθηκεύονται στο αντικείμενο.



Σχήμα 2-2: Το σχέδιο εφαρμογής του BIM, <https://www.cadtransdesign.com/bim-execution-plan.php>

2.3 Πρωτόκολλο COBie

Πριν το έργο τεθεί σε λειτουργία, ένα πλήθος ειδικών απαιτήσεων και πληροφοριών πρέπει να εφαρμοστεί κατά τη φάση σχεδιασμού και κατασκευής του. Ειδικότερα, η σωστή επεξεργασία και αποθήκευση όλων των πληροφοριών εξασφαλίζει μελλοντικά την καλύτερη λειτουργία, συντήρηση και απόδοση της κατασκευής. Από την μία πλευρά, η ενσωμάτωση των δεδομένων στα ειδικά έγγραφα επιτρέπει τον εύκολο έλεγχο των σχεδίων. Από την άλλη πλευρά, ακόμα και η ηλεκτρονική αποθήκευση των εγγράφων δεν είναι πάντα επιθυμητή καθώς στην περίπτωση που φέρουν μεγάλο πλήθος πληροφοριών εμφανίζονται ορισμένα προβλήματα. Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται είναι η δυσκολία στην εξαγωγή των δεδομένων όταν η ροή των πληροφοριών είναι πολύ μεγάλη. Παραδείγματος χάρη, στα μεγάλα έργα κτιρίων δεν εξασφαλίζεται κάποια αυτόματη διαδικασία για την επεξεργασία των πληροφοριών, αλλά απαιτείται η χειροκίνητη εξαγωγή τους, με συνέπεια να απαιτείται περισσότερος χρόνος και να αναπτύσσεται ο κίνδυνος εμφάνισης ανθρώπινων λαθών.

Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί η έγκαιρη μεταφορά των πληροφοριών, αλλά ακόμα και σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητη η μετέπειτα μεταβίβασή τους από τα έντυπα έγγραφα σε μορφή ψηφιακών αρχείων, ώστε να γίνει η ανάγνωση των στοιχείων από το λογισμικό *Computer Aided Facility Management* (CAFM). Επομένως, η πολύωρη συλλογή των πληροφοριών είναι αναπόφευκτη. Η αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος θα είχε ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου αλλά και κόστους.

Με βάση τα παραπάνω, έρχεται στο προσκήνιο το πρωτόκολλο COBie. Η διευκόλυνση που προσφέρει το COBie έγκειται στην ιεράρχηση των δεδομένων για την καλύτερη ανταλλαγή τους. Τα δεδομένα αφορούν συνήθως μη γεωμετρικά στοιχεία του έργου τα οποία προκύπτουν κατά τις διάφορες φάσεις κατασκευής του. Κατά αυτόν τον τρόπο, διαμορφώνεται ένα υποσύνολο στοιχείων IFC το οποίο μπορεί να απεικονιστεί εικονικά μέσω ενός μοντέλου που ονομάζεται *Model View Definition* (MVD). Έτσι, εξασφαλίζεται η συνεχής ενημέρωση των πληροφοριών για κάθε φάση.

Ο εργοδότης είναι υπεύθυνος για το επίπεδο των πληροφοριών που πρέπει να περιέχονται στο μοντέλο, δηλαδή για το LOI. Οι ανάδοχοι του έργου, λοιπόν, θα μπορούν να καθορίσουν το χρόνο και τον τόπο από τον οποίο θα γίνει η συλλογή των δεδομένων. Σήμερα, το πρότυπο COBie είναι ήδη αρμόδιο για το σχεδιασμό, τη λειτουργία, τη συντήρηση και τη διαχείριση των διάφορων στοιχείων με τη χρήση λογισμικού.

Το 2007, το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ εξέδωσε το πρωτόκολλο COBie στο οποίο βασίζεται το Εθνικό Πρότυπο Μοντελοποίησης Κτιριακών Πληροφοριών (*National Building Information Modeling Standard - NBIMS*) της Αμερικής και το βρετανικό πρότυπο BS 1192-4:2014. Πλήθος εμπορικών έργων επιβεβαιώνουν τη σημασία χρήσης του COBie, το οποίο, όμως, δεν αποτελεί το μοναδικό πρότυπο για την ανταλλαγή των πληροφοριών.

Το πρωτόκολλο COBie λειτουργεί σε εννιά (9) στάδια τα οποία είναι:

- Προσδιορισμός των απαιτήσεων για την υποβολή
- Χρονικός προσδιορισμός υποβολής
- Διαβίβαση υποβολής
- Έγκριση υποβολής
- Εξασφάλιση αναγκαίου εξοπλισμού
- Ανάθεση του εξοπλισμού
- Παροχή εγγυήσεων

- Δυνατότητα ανταλλακτικών πηγών
- Μετάδοση πληροφοριών για την παράδοση

Παρά τα πλεονεκτήματα που παρέχει το πρότυπο COBie, η ανάπτυξή του βρίσκεται ακόμα υπό εξέλιξη. Αυτό οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές μορφές των αρχείων. Για παράδειγμα, τα αρχεία που αποθηκεύονται σε μορφή Spread sheet ML δείχνουν ότι η διαχείριση των δεδομένων τους γίνεται από τα υπολογιστικά φύλλα Microsoft Excel. Ωστόσο, σκοπός στη πραγματικότητα είναι η αποτελεσματική ανταλλαγή των δεδομένων από την μία πλατφόρμα στην άλλη. Αυτό δεν γίνεται πάντα αντιληπτό από τον χρήστη, καθώς εξαιτίας της εξοικείωσής του με το περιβάλλον του Excel τείνουν να πιστεύουν ότι το COBie στοχεύει απλά στην δημιουργία ενός αρχείου Excel. Πολλές έρευνες, μάλιστα, έχουν επιβεβαιώσει την ανικανότητα του ανθρώπου να συλλάβει αυτή την εξάρτηση, με αποτέλεσμα να εξακολουθούν να υπάρχουν απώλειες κατά την μεταφορά των δεδομένων. Στην πράξη, οι τεχνολογικές απαιτήσεις του προτύπου COBie δεν αποτελούν τόσο σημαντικό πρόβλημα όσο η λανθασμένη εφαρμογή του.

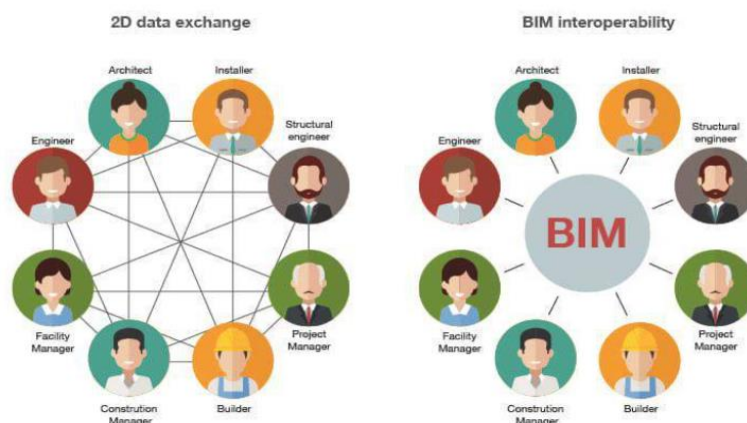
Πολλές φορές δεν γίνεται αποδεκτή η υιοθέτηση του COBie λόγω της ψευδαίσθησης ότι δυσχεραίνει την εκτέλεση των εργασιών. Ένα ακόμη αρνητικό στοιχείο που αποτελεί εμπόδιο στην κοινή αποδοχή του προτύπου είναι ότι οι αλλαγές δεν μπορούν να γίνουν κατευθείαν από το αρχείο. Για τον λόγο αυτό, πρέπει να συνεχιστούν οι μελέτες για να επιλυθούν παρόμοια προβλήματα και να βελτιστοποιηθεί η εφαρμογή του.

2.4 Κοινό Διαδικτυακό Περιβάλλον

Το ISO 19650 είναι αρμόδιο για τα εξής δύο τμήματα της τεχνολογίας BIM: τη διαχείριση του έργου και την έγκαιρη παράδοση των πληροφοριών. Η διαχείριση του έργου αναφέρεται σε όλα τα επιμέρους στάδια των διεργασιών που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την κατασκευή του έργου BIM. Ακόμη, περιλαμβάνει τα EIR και τα διάφορα επίπεδα μέχρι την ολοκλήρωση του έργου (BEP). Αντίστοιχα, η παράδοση πληροφοριών ακολουθεί μία συγκεκριμένη διαδικασία για την εκτέλεση και έπειτα την παράδοση της κατασκευής, χρησιμοποιώντας ένα Κοινό Διαδικτυακό Περιβάλλον (CDE).

Πιο αναλυτικά, ένα CDE αποτελεί έναν διαδικτυακό τόπο στον οποίο συλλέγονται όλες οι πληροφορίες, επεξεργάζονται εκτελώντας πολλές φορές μετατροπές και τελικά κοινοποιούνται. Όλοι οι μηχανικοί και τα πρόσωπα που συμμετέχουν στο έργο, έχουν πρόσβαση στα δεδομένα εξόδου τα οποία τα αποθηκεύουν στο CDE. Παράλληλα, το CDE οργανώνει όλα τα δεδομένα του μοντέλου και τα έγγραφα για τον καλύτερο συντονισμό του έργου. Η μεταφορά των δεδομένων γίνεται μέσα από μία πλατφόρμα στην οποία σχεδιάζεται ένα ενιαίο μοντέλο. Άμεση προτεραιότητα των συμμετεχόντων της κατασκευής είναι η εξασφάλιση της άριστης ποιότητας των δεδομένων. Η βασικότερη λειτουργία του CDE είναι ο έλεγχος της ποιότητας μετά από κάθε ενδεχόμενη αλλαγή που γίνεται στο μοντέλο, έτσι ώστε οι πληροφορίες του να είναι πάντα αξιόπιστες. Με άλλα λόγια, ένα CDE συνιστά την αφετηρία για την αποτελεσματική συνεργασία και επικοινωνία των συντελεστών του έργου.

Όταν τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα κεντρικό αρχείο CDE μειώνεται ο κίνδυνος υπερβολικού φόρτου πληροφοριών και ταυτόχρονα κάθε στοιχείο είναι διαθέσιμο προς επεξεργασία οποιαδήποτε στιγμή. Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα ενός CDE είναι ότι οι πληροφορίες μπορούν να ξανά χρησιμοποιηθούν. Τέλος, το σύνολο των διαδικασιών πρέπει να ολοκληρωθεί σε συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο, σύμφωνα με το *Master Information Delivery Plan* (MIDP), στο οποίο προσδιορίζονται τα πρόσωπα μεταξύ των οποίων θα γίνει η ανταλλαγή των πληροφοριών και το επίπεδο λεπτομέρειας (LoD).



Σχήμα 2-3: Η ανταλλαγή πληροφοριών εντός του πλαισίου BIM, <https://biblus.accasoft.com/en/ifc-model-what-is-it/>

2.5 Ρόλοι και υποχρεώσεις κάθε προσώπου

Διαχειριστής BIM: Αποτελεί το πρωτεύον πρόσωπο σε ένα έργο BIM. Αυτός που αναλαμβάνει αυτή τη θέση ασχολείται με τον σχεδιασμό του έργου. Μπορεί, επίσης, να αποτελέσει τον ανάδοχο του έργου ή να παίρνει πρωτοβουλίες για λογαριασμό του εργολάβου. Κύρια ευθύνη του είναι η έγκαιρη παράδοση και επίβλεψη του σχεδιασμού, η τήρηση όλων των κανονισμών του BIM και η διασφάλιση της άριστης ποιότητας. Παράλληλα, ο Διαχειριστής BIM είναι αρμόδιος για την οργάνωση των εργασιών και την εξασφάλιση συνεργατικού πνεύματος μεταξύ των συμβαλλόμενων προσώπων.

Συντονιστής BIM: Δεν θεωρείται από τους κύριους ρόλους του έργου, καθώς για οποιαδήποτε ενέργεια οφείλει να δρα υπό την επίβλεψη του Διαχειριστή του έργου. Συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος Υπεύθυνος Μοντέλου για να περιγράψει αυτόν τον ρόλο. Συγκεκριμένα, ο Συντονιστής BIM πρέπει να επιβλέπει την ανταλλαγή των πληροφοριών χωρίς καθυστερήσεις ή προβλήματα, τον διαρκή έλεγχο και την τήρηση στο μοντέλο όλων των προτύπων BIM. Εκτός από τον συντονισμό της μεταφοράς των πληροφοριών, είναι υπεύθυνος για τον εντοπισμό πιθανών απωλειών κατά την μεταφορά των δεδομένων και για την άμεση επικοινωνία των μηχανικών. Μεταξύ των αρμόδιων προσώπων της κατασκευής, ο Διευθυντής BIM εξασφαλίζει την ευρύτερη τήρηση των κανόνων και τον συντονισμό των εργαζομένων, ενώ ο Συντονιστής BIM έχει υπό την ευθύνη του τον συντονισμό του δικού του μέρους στο έργο και την υπόδειξη αλλαγών αν χρειάζεται.

Διευθυντής BIM: Ηγείται της ομάδας του έργου, δηλαδή έχει οργανωτικό και συντονιστικό ρόλο. Είναι υποχρεωμένος να ελέγχει κάθε δραστηριότητα όταν τελειώνει, ώστε να εξασφαλίσει την ποιότητα του έργου και την αποφυγή σφαλμάτων τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην κατασκευή. Πολλές φορές, χρειάζεται να επέμβει σε θέματα ασφάλειας καθώς και σε θέματα που αφορούν τη σωστή εκπαίδευση των μηχανικών ή τη χρήση των κατάλληλων υλικών και λογισμικών.

Σχεδιαστής BIM: Αναλαμβάνει πολλούς ρόλους στο έργο, αλλά ο κύριος ρόλος του είναι παραγωγικός καθώς αυτός αναπτύσσει το μοντέλο σχεδιαστικά. Μπορεί, ακόμη, να παίξει τον ρόλο του χειριστή και τεχνικού BIM. Είναι σημαντικό, όμως, πριν αναλάβει τα καθήκοντά του να έχει μία προηγούμενη εμπειρία

μοντελοποίησης τρισδιάστατων (3D) σχεδίων CAD. Έτσι, λοιπόν, ο Σχεδιαστής BIM είναι αρμόδιος τόσο για την ποιότητα των πληροφοριών που περιέχονται στο μοντέλο όσο και για ζητήματα οργάνωσης των άλλων μελών, προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη πλατφόρμα λογισμικού και τα απαραίτητα υλικά για την άρτια υλοποίηση της κατασκευής.

Καθένα από τα παραπάνω πρόσωπα έχει συγκεκριμένες αρμοδιότητες, ανάλογα με το στάδιο στο οποίο έχει προχωρήσει η διαδικασία της τεχνολογίας ενός ΜΔΠ:

Αρχική Φάση Σχεδιασμού:

Κατά την αρχική φάση του έργου, ο υπεύθυνος μηχανικός πρέπει να προσδιορίσει τα ζητήματα και τα θέματα τα οποία επεξεργαστούν για την ανταλλαγή των πληροφοριών. Για παράδειγμα, τέτοια θέματα είναι η επιλογή των αντικειμένων για την μοντελοποίηση του έργου BIM, η σειρά με την οποία πρέπει να υλοποιηθούν οι διάφορες δραστηριότητες.

Φάση Ανταλλαγής γνώσεων:

Έπειτα από τη μελέτη των εργασιών, οι μηχανικοί που είναι υπό ειδίκευση πρέπει να καλύψουν όλο το γνωστικό αντικείμενο του έργου. Στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η ψηφιοποίηση του συνόλου των γνωστικών δεδομένων, αλλά και ο έλεγχος εγκυρότητάς τους προτού χρησιμοποιηθούν από το σύστημα γνωστό ως BIMKSM (BIM Knowledge Sharing Management). Στην περίπτωση που κάποιος μηχανικός έχει ορισμένες ελλείψεις σχετικά με το μοντέλο BIM, έχει τη δυνατότητα να απευθυνθεί στους υπόλοιπους διαχειριστές του BIMKSM. Αφού τα δεδομένα ενσωματωθούν πλήρως στο σύστημα, μπορεί να γίνει η επεξεργασία τους, η μορφοποίησή τους, ακόμα και η επαναχρησιμοποίησή τους σε άλλα παρόμοια έργα.

Φάση Ενημέρωσης Γνώσεων:

Οι μηχανικοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις γνώσεις που απέκτησαν από το σύστημα σε άλλα παρόμοια έργα, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο τις εργασίες. Επιπρόσθετα, έχουν την δυνατότητα να επεξεργαστούν και να συγκρίνουν την αρχική γνώση που απέκτησαν με νέες πληροφορίες που προκύπτουν. Έτσι, επιτυγχάνεται η ενημέρωση των πληροφοριών χάρη στην νέα ενημερωμένη γνώση και αφού γίνει ο έλεγχος της ακρίβειάς τους, μπορούν να κοινοποιηθούν ξανά στα συμμετέχοντα μέλη.

Φάση Διαχείρισης Γνώσεων:

Η υιοθέτηση του συστήματος BIMKSM συνεισφέρει στην πιο γρήγορη και άμεση ανταλλαγή των πληροφοριών. Ειδικότερα, κατά τη ψηφιοποίηση του μοντέλου το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της τεχνολογίας BIM ενσωματώνει παρατηρήσεις για τυχόν διορθώσεις, προσφέροντας την πιο ενημερωμένη γνώση στους μηχανικούς. Το σύστημα BIMKSM είναι εξαιρετικά χρήσιμο για τους εξής λόγους: προσφέρει άριστη γνώση μέσω της χρήσης της γραφικής αναπαράστασης των πληροφοριών σε μία πλατφόρμα BIM, εξασφαλίζει την επικοινωνία των διάφορων κλάδων μηχανικών και χρησιμοποιεί διάφορα χρώματα για να διαχωρίσει την γνώση που αποκτάται από διαφορετικά στάδια.

Ειδικότερα, το λειτουργικό σύστημα BIMKSM αποτελεί μία διαδικτυακή πλατφόρμα μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η γρήγορη επικοινωνία των προσώπων του έργου για την αποτελεσματική διαχείριση των πληροφοριών. Εδώ κυριαρχεί η χρήση ψηφιακών μοντέλων BIM για την αποθήκευση, την μεταφορά και την επεξεργασία των δεδομένων. Με άλλα λόγια, το σύστημα BIMKSM είναι μία πλατφόρμα διασύνδεσης

με BIM αρχεία που παρέχει τις κατάλληλες γνώσεις στους μηχανικούς ανάλογα με την ειδικότητά τους. Έτσι, όλα τα εμπλεκόμενα πρόσωπα του έργου μπορούν να συνδέονται σε αρχεία BIM, να τα τροποποιήσουν όταν το κρίνουν απαραίτητο. Στο τέλος, αφού όλες οι νέες πληροφορίες αποθηκευτούν στο μοντέλο, γίνεται αυτόματη κοινοποίηση μέσω ηλεκτρονικού μηνύματος από το σύστημα, για να έχουν πρόσβαση σε αυτό οι υπόλοιποι διαχειριστές του έργου. Υπάρχει ακόμη και η δυνατότητα ο μηχανικός να χρησιμοποιεί το λειτουργικό BIMKSM για να ζητήσει λύση σε κάποιο πρόβλημα.

Μεγάλο ενδιαφέρον έχει ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκε η πλατφόρμα BIMKSM. Το λογισμικό στο οποίο λειτουργεί το σύστημα είναι το Microsoft Windows 2008, και το περιβάλλον στο οποίο αναπτύχθηκε ο κώδικας για τη δημιουργία του ονομάζεται Java. Οι τεχνολογίες HTML και JavaScript εντάσσονται κατά τη λειτουργία του λογισμικού αυτού. Το σύστημα BIMKSM λειτουργεί σε τέσσερα (4) επίπεδα: διεπαφής, πρόσβασης, εφαρμογής και βάσης δεδομένων. Το επίπεδο διεπαφής εξασφαλίζει τη σύνδεση του χρήστη με σκοπό τη διαχείριση της γνώσης. Η είσοδος στο σύστημα απαιτεί κάποιο διαδικτυακό πρόγραμμα περιήγησης, όπως είναι το Microsoft Internet Explorer ή το πιο σύγχρονο Google Chrome. Ωστόσο, η πρόσβαση δεν είναι ανοιχτή σε οποιοδήποτε πρόσωπο. Υπάρχουν συγκεκριμένα τείχη προστασίας για την ασφάλεια και τον περιορισμό εισόδου στις πληροφορίες τρίτων προσώπων. Επίσης, το σύστημα προστατεύεται μέσω ορισμένου αλγόριθμου από πιθανούς ιούς.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί περαιτέρω τεχνολογίες οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη συνεργασία, επικοινωνία και οργάνωση των μελών ενός έργου. Ειδικότερα, κάποιες από τις τεχνολογίες που έχουν βοηθήσει την αναβάθμιση των κατασκευών είναι:

- Τεχνητή νοημοσύνη: Artificial Intelligence (AI)
- Τεχνολογία Cloud: Cloud Computing (CC)
- Blockchain (BC)
- Ανάλυση Δεδομένων: Data Analysis (DA)
- Internet of Things (IoT)
- Σάρωση με λέιζερ: Laser Scanning (LS)
- Μηχανική Μάθηση: Machine Learning (ML)

Στην Μ. Βρετανία, ο τομέας της ψηφιακής αποτύπωσης των κτιρίων επιβεβαιώνει τις επαναστατικές αλλαγές που έχει επιφέρει στον κατασκευαστικό κλάδο και τονίζει την αναβάθμιση των εγκαταστάσεων χάρη στη συνεργασία της τεχνολογίας ΜΔΠ με το IoT και το DA. Ταυτόχρονα, τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει προσπάθεια ανάπτυξης των ψηφιακών διδύμων, δηλαδή ενός αντίγραφου εικονικού μοντέλου το οποίο αναπαριστά μία αληθινή κατασκευή (Digital Twin - DT). Η επίτευξη ενός τέτοιου μοντέλου απαιτεί συγκεκριμένα τεχνολογικά μέσα όπως είναι οι αισθητήρες που λειτουργούν με βάση το AI και το ML που αποτελεί τμήμα του πρώτου. Το BIM, το οποίο στην πραγματικότητα συνίσταται από ένα σύνολο τεχνολογικών διεργασιών, πρέπει να υιοθετηθεί ως μία πλατφόρμα ψηφιοποίησης δεδομένων η οποία να σηματοδοτεί την έναρξη των διαδικασιών, ώστε να ικανοποιηθεί τελικά την δημιουργία ψηφιακών διδύμων.

Δηλαδή, η τεχνολογία BIM και τα ψηφιακά δίδυμα αλληλοσχετίζονται άμεσα. Το χάσμα που δημιουργείται ανάμεσα στην πλατφόρμα BIM όπως έχει οριστεί και του BIM όπως έχει κατασκευαστεί μπορεί να καλυφθεί με τη χρήση της τεχνολογίας LS. Αντίστοιχα, τεχνολογίες όπως το CC βοηθούν στην καλύτερη συνεργασία των πληροφοριών και στοιχείων που περιέχονται εντός του μοντέλου BIM.

Ένα θέμα που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση είναι η ασφάλεια που παρέχει ο διαδικτυακός τόπος κατά την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των διαφόρων μηχανικών μιας ομάδας. Το BC εμφανίστηκε

προκειμένου να επιλύσει τέτοια ζητήματα ασφάλειας του BIM. Ωστόσο, οι έρευνες παραμένουν ακόμα σε θεωρητικό επίπεδο, καθιστώντας κρίσιμη την άμεση εφαρμογή του BC.

Η συνδυασμένη χρήση του BIM με το IoT φέρει παραπάνω πλεονεκτήματα, καθώς η μοντελοποίηση της κατασκευής μέσω του λογισμικού εμφανίζει τις πραγματικές συνθήκες σε πραγματικό χρόνο του έργου. Το πλήθος των πληροφοριών μεταφέρεται προς και από το σύστημα μέσω συσκευών IoT και τη χρήση του διαδικτύου. Κάθε συσκευή που χρησιμοποιεί τεχνολογία IoT ακολουθεί τρία βασικά στάδια: πρώτα είναι το στάδιο της αντίληψης (όπου επιλέγεται ο εξοπλισμός), μετά το επίπεδο του δικτύου (δηλαδή το Ίντερνετ και τα Bluetooth) και τέλος το στάδιο εφαρμογής.

Όσο μεγαλύτερο το πλήθος των δεδομένων που χρησιμοποιείται και επεξεργάζεται μέσα από την τεχνολογία IoT, τόσο δυσχεραίνεται η σωστή εφαρμογή και αξιοποίησή τους από το σύστημα. Για αυτό το λόγο, είναι εξαιρετικά σημαντικό να βρεθεί μία διαδικασία μέσω της οποίας θα πραγματοποιείται η σωστή διαχείριση των δεδομένων. Ειδικότερα, επισημαίνεται πως η απόδοση ενός ψηφιακού μοντέλου αυξάνεται κατακόρυφα όταν συμβάλουν στο έργο λιγότερα πρόσωπα.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση της τεχνολογίας IoT είναι ότι συνδέει τις πληροφορίες με τα στοιχεία του κτιρίου αξιοποιώντας τη τεχνική νοημοσύνη. Έτσι, οι πληροφορίες αλλάζουν και γίνονται πλέον γνώσεις για να επαναχρησιμοποιούνται παραπάνω από μία φορές και να βοηθούν στη λήψη αποφάσεων για τη σωστή διαχείριση του μοντέλου. Προκειμένου, όμως, να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία, προϋποθέτει τη συμβολή ενός ολοκληρωμένου προγραμματιστικού μοντέλου.

Τεχνολογίες όπως η DA, η AI και η ML συνεργάζονται αποτελεσματικά με το IoT και συμβάλλουν στην βέλτιστη εφαρμογή των διαδικασιών κατά τον σχεδιασμό, αλλά και τη λειτουργία του έργου. Ακόμα πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία ML συνεισφέρει σημαντικά στην ασφάλεια του μοντέλου, στην οργάνωση και ομαδοποίηση των υλικών και στην όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Κύρια βάση αυτής της τεχνολογίας είναι η αντίληψη και κατανόηση των προηγούμενων λανθασμένων ενεργειών σε μία κατασκευή και η αποφυγή του στο νέο έργο (εξοικονόμηση χρόνου και κόστους).

2.6 Βαθμός υιοθέτησης της τεχνολογίας BIM

Η τεχνολογία BIM έχει αρχίσει να επεκτείνεται με αργό ρυθμό ανά τον κόσμο. Θεωρείται ένα πρωτοπόρο λειτουργικό σύστημα στον κατασκευαστικό κλάδο το οποίο έχει διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό της συνολική διαδικασία κατασκευής ενός έργου. Ωστόσο, υπάρχουν συγκεκριμένες παράμετροι που καθιστούν την υιοθέτησή του περιορισμένη.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής αποτελούν λίγες από τις χώρες οι οποίες εφαρμόζουν συστηματικά το BIM στα έργα τους και θέλουν να επεκτείνουν περαιτέρω τη χρήση του. Το 2003, η Γενική Διοίκηση Υπηρεσιών της Αμερικής (GSA-General Services Administration) προσπάθησε να καθιερώσει την εφαρμογή του BIM για τον σχεδιασμό 3D και 4D μοντέλων σε όλα τα έργα που ανήκαν στον δημόσιο φορέα. Λίγα χρόνια αργότερα, η GSA ενσωμάτωσε την τεχνολογία ΜΔΠ για τον προγραμματισμό όλων των έργων της. Αξίζει, μάλιστα, να σημειωθεί ότι η αμερικανική βιομηχανία προσπαθεί να διευρύνει περαιτέρω την αξιοποίηση του BIM στα έργα της.

Σιγά σιγά η εξάπλωση του BIM έφτασε και στην Ευρώπη. Το 2014, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο όρισε τον κανονισμό 2014/24/ΕΕ σύμφωνα με τον οποίο κατά τη σύναψη συμβάσεων δημόσιων έργων και κατά την προκήρυξη διαγωνισμών απαιτείται η αξιοποίηση συγκεκριμένων συστημάτων όπως το BIM. Ήδη από το 2016 στο Ηνωμένο Βασίλειο έχει εφαρμοστεί υποχρεωτικά η χρήση BIM επιπέδου δύο (2) σε όλα τα δημόσια έργα που έχουν χρηματοδοτηθεί.

Οι χώρες της Σκανδιναβίας είναι πιο προχωρημένες ως προς το επίπεδο υιοθέτησης της τεχνολογίας ΜΔΠ. Ο Κυβερνητικός Οργανισμός Κτιρίων της Ολλανδίας έχει εντάξει το BIM για την υλοποίηση όλων

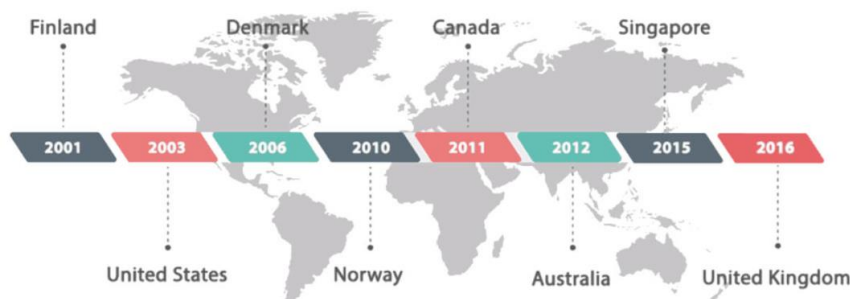
των δημόσιων έργων ήδη από το 2011. Άλλες χώρες, στις οποίες το BIM παίζει σημαντικό ρόλο στον τομέα της βιομηχανίας αποτελούν, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ισπανία, η Βραζιλία και η Αυστρία. Ειδικότερα, οι Κάτω Χώρες (Γαλλία, Γερμανία, Ισπανία) έχουν προχωρήσει στον σχεδιασμό οδικών χαρτών BIM. Μία έρευνα, που σκοπό είχε να ερευνήσει το ποσοστό των εργαζομένων που χρησιμοποιούσαν το BIM, έδειξε ότι εντός των 300 περίπου κατασκευαστικών εταιρειών της Εσθονίας, το 51% των εργαζομένων εφαρμόζαν ήδη την τεχνολογία αυτή στη δουλειά τους ή ένα μικρό ποσοστό στόχευε να την χρησιμοποιήσει εντός των επόμενων πέντε (5) ετών. Η Φιλανδία από την πλευρά της, ξεκίνησε να ενσωματώνει την τεχνολογία αυτή στα έργα της από το 2001. Αργότερα, το 2007 οι φινλανδικές αρχές οριστικοποίησαν την εφαρμογή της για όλα τα έργα και την κατέστησαν υποχρεωτική. Αντιστοίχως, η Νορβηγία και η Σουηδία έχουν πραγματοποιήσει μεγάλα βήματα όσον αφορά το BIM.

Σε παρόμοια κλίμακα, χώρες της Ασίας όπως η Σιγκαπούρη και η Νότια Κορέα υλοποιούν την τεχνολογία ΜΔΠ στα δημόσια έργα από το 2015. Αποτελούν τις πλέον εξελιγμένες χώρες οι οποίες έχουν σημειώσει ιστορία στην εφαρμογή του BIM στις κατασκευές τους. Αντίστοιχα, στο Χονγκ Κονγκ οι κυβερνητικές οργανώσεις απαίτησαν την εφαρμογή της τεχνολογίας στα δημόσια έργα κατά τη φάση σχεδιασμού και κατασκευής τους. Η Ομοσπονδία Εργολάβων Κατασκευών της Ιαπωνίας (JFCC - Japan Federation of Construction Contractors), προκειμένου να ενσωματώσει τη χρήση του BIM στα έργα προσπάθησε να πάρει έγκριση από την Κατασκευαστική Επιτροπή. Στις χώρες της Μέσης Ανατολής και της Αφρικής, όμως, ερευνητές επιβεβαιώνουν το χαμηλό ποσοστό εφαρμογής του BIM. Παρακάτω, φαίνεται αναλυτικά ο βαθμός χρήσης του BIM σε διάφορες χώρες, καθώς και το έτος που εφαρμόστηκε.

Πίνακας 2-1: Η χρήση της τεχνολογίας BIM σε διάφορες χώρες του κόσμου

ΧΩΡΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΡΗΣΗΣ
Αυστραλία	67% (2016)
Καναδάς	78% (2018)
Κίνα	67% (2014)
Τσεχία	25% (2016)
Δανία	78% (2016)
Εσθονία	51% (2015)
Ιαπωνία	46% (2016)
Πολωνία	23% (2015)
Ηνωμένο Βασίλειο	74% (2018)
Η.Π.Α.	79% (2017)

Επομένως, διαφαίνονται οι προσπάθειες επέκτασης και ένταξης της τεχνολογίας ΜΔΠ σε διεθνές, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο.



Σχήμα 2-4: Η ένταξη της τεχνολογίας ΜΔΠ ανά δεκαετία, <https://www.lodplanner.com/what-is-bim/>

Σε ευρωπαϊκή κλίμακα, οι κατασκευαστικές βιομηχανίες διαδραματίζουν αναπόσπαστο ρόλο για την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC-European Commission), αφού είναι υπεύθυνες για την κατασκευή και την συντήρηση των κτιριακών μονάδων για λόγο άλλων οικονομικών φορέων και αποτελούν την αφετηρία για την έναρξη όλων των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Ο

κατασκευαστικός τομέας της ΕΕ συνιστά το 9% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος και διακρίνεται για την δύναμή του ως ο μεγαλύτερος κλάδος ανάπτυξης της Ευρώπης, παραβλέποντας την αποδυνάμωσή του στις αρχές της δεκαετίας του 2010 εξαιτίας της απότομης οικονομικής ύφεσης. Ο δυναμικός χαρακτήρας του τομέα αυτού φαίνεται τόσο από τον μεγάλο αριθμό εργαζομένων της ΕΕ που επηρεάζονται από αυτόν, ο οποίος ανέρχεται σε πληθυσμό περίπου 43.6 εκατομμύρια, όσο και από το μεγάλο ποσοστό ενεργειακής κατανάλωσης που απαιτούν οι κτιριακές εγκαταστάσεις στην Ευρώπη, το οποίο σημειώνεται 40%-45%. Το υπόλοιπο 5%-10% αφορά την μετακίνηση των κατασκευαστικών υλικών.

Στο πλαίσιο της Στρατηγικής Πολιτικής 2020, η οποία αποσκοπεί στην ασφάλεια και στην βελτίωση βιώσιμων και έξυπνων υποδομών, καθώς και της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2014/24/ΕΕ, εμφανίζεται ο όρος *Building Information Modeling*. Ο όρος επισημαίνεται στο άρθρο 22, το οποίο προβλέπει ότι κατά την σύναψη συμβάσεων δημοσίων έργων και την υποβολή προσφορών, τα μέλη της ΕΕ οφείλουν να χρησιμοποιούν ειδικά ηλεκτρονικά εργαλεία μοντελοποίησης. Η Ομάδα Εργασίας της Ευρώπης EUBIM τονίζει την σημασία ένταξης της τεχνολογίας BIM στα δημόσια έργα ώστε αργότερα να μπορέσει να εφαρμοστεί και στον ιδιωτικό τομέα. Ως άμεσο στόχο θέτει την αναβάθμιση της σχέσης ποιότητας-τιμής, την βελτίωση της ποιότητας των ακινήτων σε μία πόλη, καθώς και την μείωση της ανταγωνιστικότητας της βιομηχανίας σε βιώσιμα επίπεδα. Για να το επιτύχει αυτό, υλοποίησε τα παρακάτω πρωτόκολλα:

Πρωτόκολλο Δημιουργίας: αναλύει τη διαδικασία σχεδιασμού ενός μοντέλου BIM και καθορίζει τις απαιτούμενες ενέργειες ελέγχου του παραδοθέντος έργου.

Πρωτόκολλο Εφαρμογής: καθορίζει με ποιον τρόπο πρέπει να εφαρμοστεί το BIM κατά την κατασκευή του έργου.

Πρωτόκολλο Συντήρησης: διαμορφώνει τις κατάλληλες συνθήκες εφαρμογής του BIM για τη συντήρηση του έργου.

Πρωτόκολλο Διαχείρισης: αποφασίζει ποιες πληροφορίες πρέπει να περιέχονται στο μοντέλο ανάλογα με τη φάση του κύκλου ζωής του έργου.

Προκειμένου να εξεταστεί ο βαθμός ικανοποίησης από την εφαρμογή της τεχνολογίας BIM των εργαζόμενων στις διάφορες εταιρείες, υποβλήθηκε ο καθένας από αυτούς σε μία έρευνα και έπειτα εξήγαγαν τα αποτελέσματα της κοινής γνώμης. Το 21% των ερωτηθέντων είχαν τη θέση του Κυρίου του έργου, το 14% εργάζονταν ως Διαχειριστές του έργου και το υπόλοιπο 3,5% αποτελούσαν από υπεύθυνους στον τομέα του μάρκετινγκ, στον τομέα του σχεδιασμού και στον τομέα διαχείρισης και συντονισμού του έργου. Συμπεραίνουμε πως παρόλο που τα ερωτηματολόγια δεν κατανεμήθηκαν ομοιόμορφα στα διάφορα πρόσωπα του έργου, εντούτοις όλοι κατείχαν σημαντικούς ρόλους στον κάθε οργανισμό. Έτσι, η συνολική αξιολόγηση ήταν έγκυρη για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τον κατασκευαστικό τομέα.

Στο πρώτο στάδιο της έρευνας, ζητήθηκε από όλους τα μέλη να συμπληρώσουν κάποια έγγραφα με σκοπό να εκφράσουν την εμπειρία τους μέχρι εκείνη τη στιγμή έχοντας ενσωματώσει το BIM σε όλες τις φάσεις της εργασίας τους. Πριν την υποβολή της προσωπικής τους γνώμης, ο κάθε μηχανικός είχε πρόσβαση στα σχόλια που είχαν κοινοποιήσει οι άλλοι συνάδελφοί του μέσω του συστήματος BIMKSM. Στη συνέχεια, ψηφιοποιήθηκαν αυτά τα έγγραφα και αποθηκεύτηκαν σε αρχεία τα οποία κλήθηκαν αργότερα να μελετήσουν οι ανώτεροι μηχανικοί. Ο βασικός τους στόχος ήταν συζητήσουν τα αποτελέσματα του κάθε ερωτηματολογίου, να κρατήσουν σημειώσεις από τις ουσιαστικότερες πληροφορίες και να προτείνουν λύσεις σε πιθανά προβλήματα που είχαν προκύψει. Όλες οι πληροφορίες εισάγονταν στη βάση δεδομένων αποκόποντας, όμως, δεδομένα δευτερεύουσας σημασίας. Στις περιπτώσεις όπου επιλέγονταν εναλλακτικές λύσεις συγκριτικά με τις ήδη προτεινόμενες, το σύστημα

BIMKSM ενημερωνόταν άμεσα με νέο σύνολο γνώσεων και τα μέλη ειδοποιούνταν για τις αλλαγές μέσω μηνύματος.

Ύστερα από ενδελεχή ανάλυση των αποτελεσμάτων, διαπιστώθηκε ότι οι πληροφορίες μεταφέρονται και ενημερώνονται ταχύτατα με τη χρήση του λειτουργικού BIMKSM. Για την εξακρίβωση των συμπερασμάτων, πραγματοποιήθηκε επανέλεγχος του συστήματος για να επιβεβαιωθεί ότι το BIMKSM ανέλυε τις εργασίες όπως απαιτούσε ο σχεδιασμός τους. Ειδικότερα, δεκαοχτώ (18) μέλη του έργου ζητήθηκαν να συμπληρώσουν ένα ερωτηματολόγιο αφού έχουν πρότινος ανατροφοδοτήσει το σύστημα. Τα πρόσωπα αυτά προέρχονταν από διαφορετικές θέσεις στο έργο: οι δύο (2) ήταν οι διαχειριστές του έργου έχοντας πολυετή εμπειρία, οι δεκατρείς (13) ήταν μηχανικοί που εργάζονταν στο εργοτάξιο, από τους οποίους οι έξι (6) είχαν εμπειρία δέκα (10) ετών και οι υπόλοιποι επτά (7) εμπειρία πέντε (5) ετών, οι δύο (2) εργάζονταν ως βοηθητικό προσωπικό έχοντας συμπληρώσει τριετή εμπειρία και ο τελευταίος είχε αναλάβει τη θέση του CKO με δεκαετή εμπειρία.

Τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου έδειξαν ότι η πλειοψηφία των συμμετεχόντων είχαν θετική άποψη για την ενσωμάτωση της τεχνολογίας αυτής στη δουλειά τους. Ακόμα και οι διαχειριστές του έργου συμφώνησαν ότι το σύστημα BIMKSM τους επιτρέπει να έχουν την μία συνολική εικόνα των πληροφοριών στο περιβάλλον του BIM. Τα επικρατέστερα πλεονεκτήματα που υπογραμμίζουν οι ερωτηθέντες της έρευνας συνοψίζονται στα εξής:

- Το 86% συμφώνησε ότι έχουν τη δυνατότητα της τρισδιάστατης (3D) εικόνας του έργου.
- Το 89% επισημαίνει ότι μπορούν να έχουν καλύτερη εικόνα των αποτελεσμάτων χάρη στα κινούμενα γραφικά σχέδια του BIM.
- Το 90% τονίζει τη σαφήνεια με την οποία εξάγονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και τη δυνατότητα διαχείρισης διαφορετικών πληροφοριών στο περιβάλλον BIM.
- Τέλος, το 88% δίνουν περισσότερη έμφαση στη δυνατότητα επεξεργασίας της γνώσης που απέκτησαν, καθώς και της βελτιωμένης επικοινωνίας μεταξύ τους χάρη στην καλύτερη ανταλλαγή των αρχείων.

Στην Αυστραλία, μία άλλη έρευνα που διεξάχθηκε το 2010 στην εταιρεία Allen Consulting Group έδειξε ότι από τους πενήντα έξι (56) εργολάβους μηχανικούς και κατασκευαστές, το 75% είχε ενσωματώσει την τεχνολογία BIM στα έργα τους. Την ίδια περίοδο, μία μελέτη των Gerrard και Kymmell επιβεβαίωσε ότι ποσοστό των εργαζομένων στον κατασκευαστικό κλάδο της Αυστραλίας, που έχει εξοικειωθεί και είναι υπέρ της χρήσης του BIM, είναι σημαντικά μικρό (περίπου 7%).

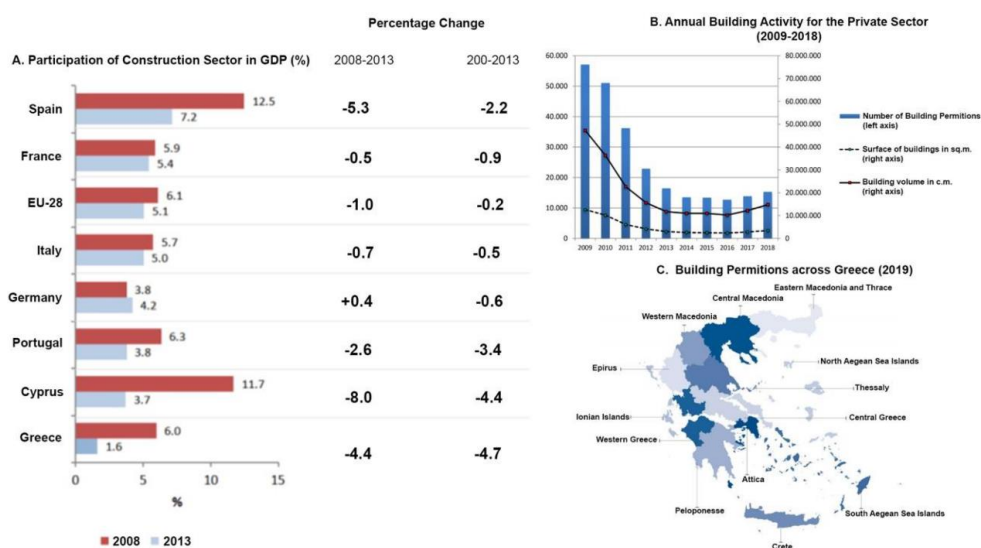


Σχήμα 2-5: Οι χώρες που χρησιμοποιούν περισσότερο την τεχνολογία ΜΔΠ, <https://www.bimspot.io/blogs/bim-adoption-in-the-world/>

2.7 Η τεχνολογία BIM στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η υιοθέτηση του BIM βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο λόγω, κυρίως, της δυσκολίας ένταξης της οδηγίας αυτής στο ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο, καθώς και των ιδιαίτερων απαιτήσεων και συνθηκών που επικρατούν στον ελληνικό κατασκευαστικό κλάδο, οι οποίες δεν ισχύουν στις άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Έτσι, καθίσταται επιτακτική ανάγκη να γίνουν ορισμένες μετατροπές στη νομοθεσία της Ελλάδας, ώστε να ενταχτεί κι αυτή στο σύνολο των χωρών που χρησιμοποιούν BIM. Οι κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες που συνεχίζουν να υπάρχουν στον ελλαδικό βιομηχανικό χώρο περιγράφονται ακολούθως συνοπτικά.

- ✓ Την θέση της οργανωμένης δόμησης ανέλαβε σταδιακά ο ιδιωτικός τομέας με την καθιέρωση της αντιπαροχής ως κύριο παράγοντα διαμόρφωσης πόλεων, όπως η Αθήνα ή ο Πειραιάς. Ειδικότερα, το 1950 η κρατικοποίηση της ανάπτυξης των κτιριακών έργων άγγιζε το 9.3% του προϊόντος, ένα ποσοστό το οποίο το 1960 μειώθηκε στο 1.8% και το 1970 στο 1.5%. Κατά συνέπεια, τον κυρίαρχο ρόλο στις ελληνικές αστικές τάξεις έπαιζαν πλέον κοινωνικές ομάδες οι οποίες αποτελούνταν από μικροϊδιοκτήτες. Η νέα, λοιπόν, πραγματικότητα συνέβαλε από το 1950 στην συνύπαρξη και κατόπιν στη σύγκρουση πολλών διαφορετικών κλάδων της βιομηχανίας, αλλά και στην διεύρυνση της άτυπης δόμησης κτιρίων. Η καθιέρωση των άτυπων οικισμών αποτέλεσαν τμήμα του αστικού ελληνικού χώρου.
- ✓ Η ύπαρξη μικροϊδιοκτητών συνέβαλε στην περαιτέρω εμφάνιση των μικροεργολάβων, με άμεση συνέπεια να καταργείται η τυποποιημένη διαδικασία κατασκευής και να αντικαθίσταται από τα προσωπικά συμφέροντα του κάθε εργολάβου.
- ✓ Κάθε χρόνο βασική παράμετρο για την αύξηση της ελληνικής οικονομίας αποτελούσε η συνεχής κατασκευαστική δραστηριότητα. Πριν το 2008, δηλαδή πριν την εμφάνιση της ελληνικής κρίσης στην οικονομίας, ο κατασκευαστικός κλάδος αποτελούσε κύριο τμήμα του ελληνικού ΑΕΠ, το οποίο έφτανε τα ποσοστά που άγγιζαν χώρες όπως η Γαλλία, η Ιταλία και η Γερμανία. Κατά τα πρώτα πέντε (5) έτη της οικονομικής κρίσης (2008-2013), ζημιώθηκε αρκετά η κατασκευαστική βιομηχανία της Ελλάδας, καθώς παρατηρήθηκε μείωση ανάπτυξης έργων κατά 3.5 ποσοστιαίες μονάδες ΑΕΠ συγκριτικά με την κατάσταση που επικρατούσε στην ΕΕ. Ωστόσο, από το 2017 και έπειτα ο ελλαδικός χώρος άρχισε να ανθίζει ξανά με νέες κατασκευαστικές άδειες κάθε χρόνο. Η δημιουργία νέων έργων αποκτά αυξητική πορεία και με την εγκαθίδρυση της τεχνολογίας ΜΔΠ προβλέπεται σημαντική μείωση χρόνου, κόστους και διαχείρισης της κάθε κατασκευής.



Σχήμα 2-6: Η χρήση του BIM στην Ελλάδα, συγκριτικά με τις άλλες χώρες, <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/4/1371>

Η περιορισμένη εφαρμογή του BIM επιβεβαιώνεται και από την περιορισμένη συνεργασία που δείχνουν οι αρμόδιοι φορείς. Συγκεκριμένα, δύο μόνο μέλη της ομάδας EUBIM συμμετέχουν στις σχετικές διαδικασίες: ο εκπρόσωπος του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας και ο εκπρόσωπος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (ΤΕΕ). Το μοναδικό έργο στον ελλαδικό χώρο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία ΜΔΠ αποτελεί το Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος.

Με σκοπό, λοιπόν, την προώθηση της συντονισμένης εφαρμογής της τεχνολογίας ΜΔΠ, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας πρότεινε την σύσταση μιας Διυπουργικής Ομάδας. Με τη δημιουργία της Ομάδας προώθησης BIM, η οποία θα αποτελείται από πέντε (5) μέλη, ενισχύεται το όραμα ένταξης της Ελλάδας στην οργάνωση EUBIM για την καθιέρωση της «ψηφιακής κατασκευής». Τα πρόσωπα στα οποία απευθύνεται αυτή η Ομάδα είναι ο δημόσιος φορέας (αναθέτουσα αρχή, ιδιοκτήτης, δημόσιοι υπάλληλοι), ο ιδιωτικός φορέας (μελετητές, κατασκευαστές, εργολάβοι, επιχειρήσεις) και οι εκπαιδευτικοί φορείς. Τα στάδια για την επίτευξη της όλης διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

- Ανάπτυξη ενός σχεδίου δράσης το οποίο θα αφορά 3 έως 5 στάδια ωρίμανσης του BIM και θα οργανώνει τις δραστηριότητες των επιμέρους υποομάδων.
- Διαμόρφωση ενός εθνικού νομικού πλαισίου το οποίο θα συμβαδίζει με τις αρχές των ευρωπαϊκών κανονισμών και θα βοηθά στη επίλυση ζητημάτων νομικής φύσεως, στην αποδοχή και πιστοποίηση του BIM σε εθνικό επίπεδο και θα παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες ανοιχτού τύπου για τη δημιουργία μελλοντικών μοντέλων.
- Επεξεργασία και αναβάθμιση των δεδομένων με βάση το είδος του κάθε υπό μελέτη έργου.
- Σταδιακή εναρμόνιση των κανονισμών και των συμβάσεων με τα ισχύοντα πρότυπα και αναθεώρησή τους σε περίπτωση αλλαγών των ευρωπαϊκών αρχών.
- Ταυτόχρονη συγκέντρωση και αξιολόγηση στοιχείων μιας μελέτης πριν την ολοκλήρωσή της.
- Δημιουργία ενός δικτύου συνεχής ενημέρωσης των ενδιαφερόμενων προσώπων μέσα από διαδικτυακούς ιστότοπους.
- Ενσωμάτωση του αντικειμένου BIM στα εκπαιδευτικά ιδρύματα ή σε σεμινάρια μηχανικών.
- Χρηματοδότηση της δράσης των ομάδων.

Με την υλοποίηση της τεχνολογίας ΜΔΠ ο κατασκευαστικός τομέας εξοικονομεί χρόνο και κόστος, υπό την προϋπόθεση ότι όλες οι διαδικασίες ακολουθούνται με ασφαλή τρόπο. Εφόσον τεθεί υποχρεωτική η εφαρμογή του BIM, η Ελλάδα πρέπει να προσαρμόσει το ελληνικό δίκαιο στην ευρωπαϊκή νομοθεσία. Τελικά, στον ελλαδικό χώρο θα εμφανίζονται δύο ξεχωριστές τάξεις μηχανικών: από την μία πλευρά θα έχουμε τους μηχανικούς παλαιότερης γενιάς οι οποίοι θα εφαρμόζουν τις ήδη γνωστές τεχνικές με την προσθήκη ορισμένων ψηφιακών στοιχείων και από την άλλη πλευρά θα δραστηριοποιούνται οι νέοι μηχανικοί οι οποίοι θα μπορούν να προσαρμοστούν γρηγορότερα στις νέες δυνατότητες σχεδιασμού με την κατάλληλη εκπαίδευση. Ωστόσο, η τεχνολογία BIM αποβλέπει στον περιορισμό του χάσματος μεταξύ των μηχανικών, ώστε να απλοποιηθούν οι έλεγχοι και οι εγκρίσεις των διαδικασιών μέσω των υπουργικών αποφάσεων.

Γενικότερα, στη σύγχρονη εποχή ψηφιοποίησης, ο σχεδιασμός με βάση τις αρχές του BIM δίνει μεγαλύτερη έμφαση στον τρόπο συλλογής πληροφοριών και στην επεξεργασία τους σε μία βάση δεδομένων συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού. Οι μηχανικοί δεν αντιμετωπίζουν πλέον το κάθε κτίριο μεμονωμένα, αλλά διαμορφώνουν και επεξεργάζονται το σύνολο των κτιρίων σαν μία ενιαία αστική μονάδα στα πλαίσια της Βιώσιμης Ανάπτυξης και του βέλτιστου πολεοδομικού σχεδιασμού.

3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΜΜΙΚΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

3.1 Περιγραφή αντικειμένου μελέτης

Με σκοπό να εφαρμόσουμε την τεχνολογία BIM στην πράξη, επιλέχθηκε να μελετηθεί υπαρκτή σύμμικτη κατασκευή η οποία βρίσκεται στην Ισπανία και ολοκληρώθηκε το 2021. Η κατασκευή με όνομα «Zara Logística» αφορά το κτίριο γραφείων της εταιρείας «Zara» της αρχιτεκτονικής εταιρείας Batlleiroig. Τα κύρια δομικά στοιχεία του κτιρίου σχεδιάστηκαν από χάλυβα, ενώ τα δευτερεύοντα στοιχεία και η πλάκα κάθε ορόφου λήφθηκαν ως σύμμικτα. Για την ανάλυση της κατασκευής έγινε η προσπάθεια να σχεδιαστούν όλα τα στοιχεία όπως είναι στο πραγματικό κτίριο και ο υπολογισμός των φορτίων έγινε με βάση τις ισχύουσες κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα για την Ισπανία. Μετά την μόρφωση του φορέα, πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση όλων των μελών σύμφωνα με τους κανονισμούς και τέλος έγινε η ενεργειακή ανάλυση της κτιριακής εγκατάστασης.

Συγκεκριμένα, το κτίριο βρίσκεται στην περιοχή Arteixo εντός της Coruña και καταλαμβάνει μία περιοχή έκτασης 163184 m². Το κτίριο είναι μεγάλο με πολλούς χώρους και η βιωσιμότητά του είναι φιλική ως προς το περιβάλλον. Ακόμη, επιτρέπει τον φωτισμό από το φυσικό φως και διαθέτει σύστημα φυσικού αερισμού, καθιστώντας τον εσωτερικό χώρο εξαιρετικής ποιότητας σε αέρα. Αποτελείται από πέντε (5) συνολικά ορόφους με αρκετά μεγάλο ελεύθερο ύψος ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες εργασίας της εταιρείας. Κάθε όροφος έχει κάτοψη 90x90 m, μέγιστο ύψος ίσο με 5.4 m και καθαρό ύψος 3.55 m. Το συνολικό ύψος ανέρχεται στα 27 m. Τα εξωτερικά υποστυλώματα τοποθετούνται ανά 2.50 m στην διεύθυνση X και ανά 2.25 m στη διεύθυνση Y. Τα εσωτερικά υποστυλώματα διατάσσονται ανά 10 m κατά τη διεύθυνση X και ανά 9 m κατά τη διεύθυνση Y.

Εξωτερικά το κτίριο επικαλύπτεται από σύνολο υαλοπινάκων μεγάλης αντοχής και απόδοσης. Στο εξωτερικό περίβλημα του κτιρίου εντάσσονται και το σύνολο των πυλώνων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμομονωτική του ικανότητα και αντίστοιχα να μειώνονται οι απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης. Όσον αφορά την οροφή και την πρόσοψη του κτιρίου, έχει επιλεγεί λευκό χρώμα ώστε να έχει λιγότερη απορρόφηση θερμικής ενέργειας και να δημιουργεί την εντύπωση για μεγαλύτερο βάθος .

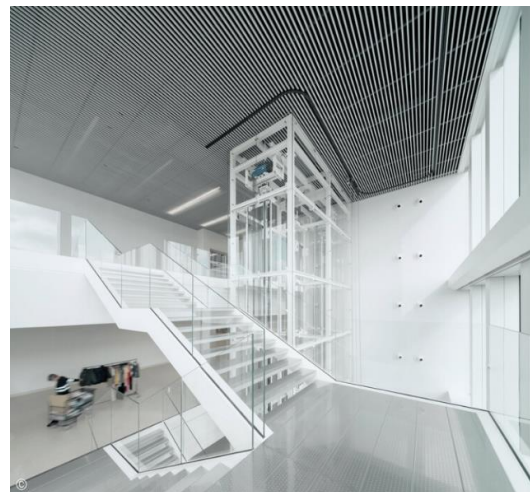


Σχήμα 3 1: Το υπό μελέτη κτίριο στην περιοχή Arteixo της Ισπανίας, [43]

Τόσο στη δεξιά όσο και στην αριστερή πλευρά του εσωτερικού χώρου έχει κατασκευαστεί κλιμακοστάσιο για την καλύτερη και γρηγορότερη μετακίνηση των χρηστών μεταξύ των ορόφων. Οι σκάλες έχουν μεγάλο εύρος και είναι τοποθετημένες σε σημείο όπου εισέρχεται φυσικό φως. Έτσι, ενθαρρύνεται η χρήση τους έναντι του ανελκυστήρα, ο οποίος καταναλώνει αρκετή ενέργεια.



(α)



(β)

Σχήμα 3-2: Ο χώρος διαμόρφωσης (α) του ανελκυστήρα και (β) των κλιμάκων, [43]

Κατά τις δύο διευθύνσεις τα υποστυλώματα με τις δοκούς λειτουργούν ως πλαίσια. Η σύμμικτη πλάκα σε κάθε όροφο στηρίχθηκε πάνω στις δευτερεύουσες δοκούς οι οποίες τοποθετήθηκαν κατά την διεύθυνση Y με απόσταση 1.25 m μεταξύ τους και συνδέονται αμφιαρθρωτά με τις κύριες δοκούς. Η σύνδεσή της πλάκας με τις δοκούς πραγματοποιήθηκε μέσω διατμητικών ήλων. Τέλος, η θεμελίωση του φορέα προσομοιώθηκε με την τοποθέτηση πακτώσεων με τις εξής μετακινησιακές ελευθερώσεις: για τα εξωτερικά υποστυλώματα κατά τη διεύθυνση X δόθηκαν ελευθερώσεις κατά X , για τα εξωτερικά υποστυλώματα κατά Y προστέθηκαν ελευθερώσεις κατά Y και τέλος, για τα εσωτερικά υποστυλώματα μπόκαν ελευθερώσεις κατά X και κατά Y , ώστε να λειτουργούν ως προς τον ισχυρό τους άξονα.

3.2 Δομικά στοιχεία μελών

3.2.1 Δομικός χάλυβας

Επιλέχθηκε δομικός χάλυβας ποιότητας *S355* ο οποίος εφαρμόστηκε στα υποστυλώματα και στις κύριες δοκούς κατά τις διευθύνσεις Χ και Υ. Τα χαρακτηριστικά του χάλυβα αναφέρονται παρακάτω:

- Χαρακτηριστική τάση διαρροής: $f_y = 355$ MPa
- Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή: $f_u = 510$ MPa
- Μέτρο ελαστικότητας: $E = 210000$ MPa
- Μέτρο διάτμησης: $G = 81000$ MPa
- Λόγος Poisson στην ελαστική περιοχή: $\nu = 0.3$
- Ειδικό βάρος: $\gamma = 78.5$ kN/m³
- Πυκνότητα: $\rho = 7850$ kg/m³

3.2.2 Σκυρόδεμα

Για τη σύμμικτη πλάκα του κάθε ορόφου επιλέχθηκε σκυρόδεμα ποιότητας *C30/37* με τα εξής χαρακτηριστικά:

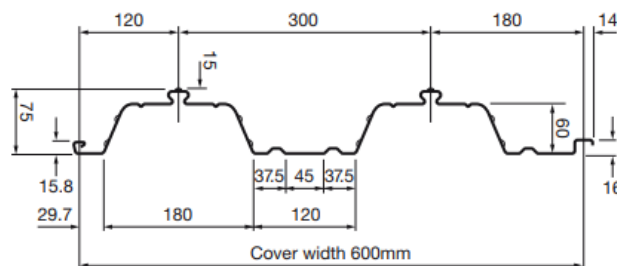
- Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή: $f_{ck} = 30$ MPa
- Μέση εφελκυστική αντοχή: $f_{ctm} = 2.9$ MPa
- Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή 5%: $f_{ctk,0.05} = 2$ MPa
- Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή 95%: $f_{ctk,0.95} = 3.8$ MPa
- Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας: $E_{cm} = 33$ GPa
- Ειδικό βάρος ξηρού σκυροδέματος: $\gamma_c = 25$ kN/m³
- Ειδικό βάρος νωπού σκυροδέματος: $\gamma_c = 26$ kN/m³

3.2.3 Χάλυβας οπλισμού

Για το οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο χρησιμοποιείται στις σύμμικτες πλάκες, επιλέγεται οπλισμός ποιότητας χάλυβα *B500C* με χαρακτηριστικό όριο διαρροής $f_{yd} = 500$ MPa. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του χάλυβα οπλισμού είναι ίδια με τα αντίστοιχα του δομικού χάλυβα.

3.2.4 Χαλυβδύφυλλο

Για τη σύμμικτη πλάκα επιλέγεται το χαλυβδόφυλλο *ComFlor 60* της εταιρείας *TATASteel* ύψους 60mm (συνολικό ύψος 75 mm) και πάχους 0.9 mm, με ποιότητα χάλυβα *S350* ($f_{yb} = 350$ MPa).



Σχήμα 3-3: Το χαλυβδόφυλλο ComFlor 60 της εταιρείας TATASteel,

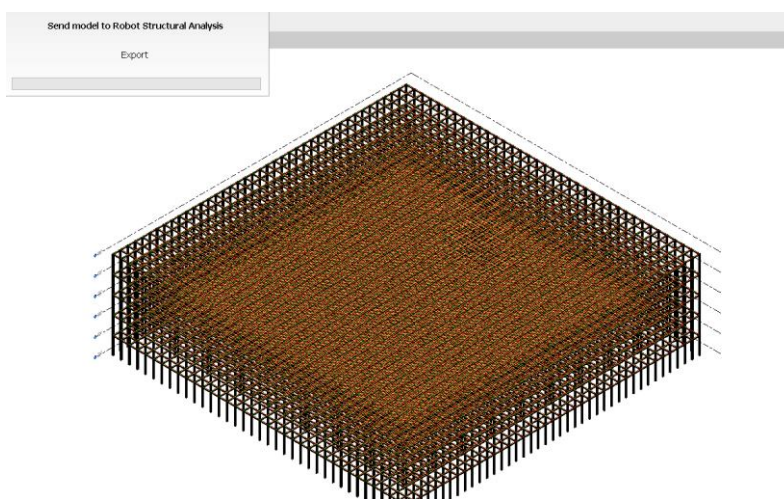
<https://www.tatasteurope.com/construction/products/flooring/composite-floor-deck/comflor-60>

3.3 Προσομοίωση φορέα

3.3.1 Revit

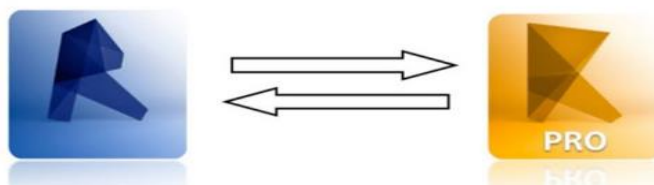
Η προσομοίωση του φορέα πραγματοποιήθηκε αρχικά στο πρόγραμμα *Revit* της εταιρείας *Autodesk*. Σχεδιάστηκαν τα υποστυλώματα, οι κύριοι δοκοί και οι στηρίξεις του φορέα. Ωστόσο, δεν προστέθηκαν οι δευτερεύουσες δοκοί και οι σύμμικτες πλάκες, καθώς σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν ως ξεχωριστά μοντέλα σε άλλα σχεδιαστικά προγράμματα.

Όσον αφορά το σχεδιαστικό πρόγραμμα *Revit*, μπορεί να αξιοποιηθεί από όλες τις ειδικότητες μηχανικών. Αποτελεί το βασικότερο πρόγραμμα το οποίο είναι συυφασμένο με την τεχνολογία BIM. Δίνει τη δυνατότητα σχεδίασης ενός μοντέλου και στις επτά (7) διαστάσεις του, καθώς ο χρήστης μπορεί να εργαστεί με το κτίριό του στις δύο (2) διαστάσεις, να το μετατρέψει σε τρισδιάστατη όψη, καθώς και να υπολογίσει το συνολικό κόστος, τον χρονικό προγραμματισμό και την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων του. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να επεξεργάζεται το μοντέλο του στη δισδιάστατη μορφή του και ταυτόχρονα να γίνεται ενημέρωση του τρισδιάστατου μοντέλου. Ακόμη, εκτός από την ολοκληρωμένη σχεδίαση ενός κτιρίου μπορεί να γίνει και η ένταξη στο περιβάλλον του *Revit* ενός ήδη έτοιμου γεωμετρικού μοντέλου. Η βασικότερη, όμως, λειτουργία του *Revit* είναι η δυνατότητα ανταλλαγής αρχείων *dwg* μεταξύ των υπόλοιπων εφαρμογών της *Autodesk*. Ο μηχανικός σχεδιάζει την κατασκευή ως ένα φυσικό μοντέλο, όπως θα είναι στην πραγματικότητα, ενώ παράλληλα δημιουργείται και το αναλυτικό μοντέλο του κτιρίου στο οποίο διαφαίνονται καλύτερα τα δομικά χαρακτηριστικά του. Οι δύο διαφορετικές αυτές αναλύσεις του κτιρίου συνυπάρχουν και επηρεάζουν η μία την άλλη.



Σχήμα 3-4: Η σχεδίαση του φορέα στο πρόγραμμα Revit και η εξαγωγή του στο Robot

Το πρόγραμμα *Revit* συνδέεται άμεσα με το *Robot*, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την ομαλή ροή των δεδομένων του μοντέλου. Σε περίπτωση που πραγματοποιηθούν αλλαγές στο μοντέλο μέσω του *Robot*, το αντίστοιχο μοντέλο στο *Revit* ενημερώνεται άμεσα και αντίστροφα. Η αμφίδρομη αυτή διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο προγραμμάτων έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά ο χρόνος και η κόυραση του χρήστη, αλλά και να αποφεύγονται πιθανά σφάλματα κατά τις χειροκίνητες αλλαγές με σκοπό τον συντονισμό των δύο μοντέλων. Συνήθως προτιμάται να γίνεται αρχικά η αρχιτεκτονική σχεδίαση του κτιρίου μέσω του προγράμματος *Revit* και έπειτα η μετάβασή του στο *Robot*, όπου θα γίνει η αναλυτικότερη διαστασιολόγηση και σχεδίασή του, χωρίς, όμως, να απαγορεύεται η αντίστροφη διαδικασία.



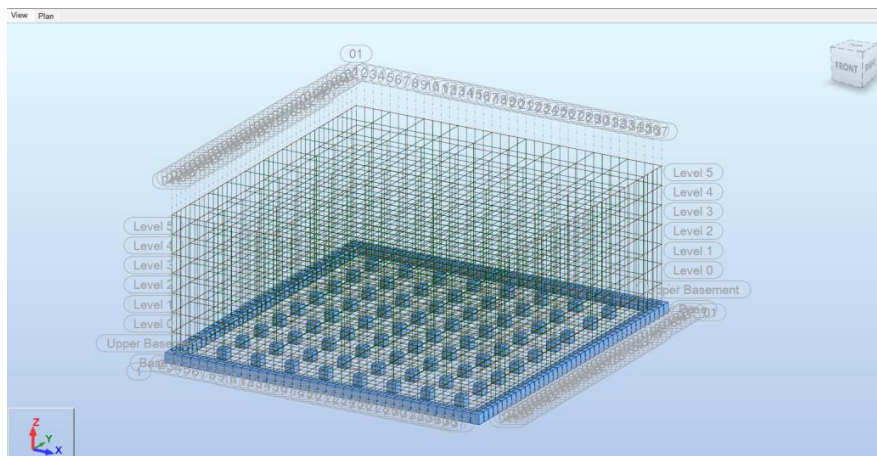
Σχήμα 3-5: Η διαλειτουργικότητα των προγραμμάτων Revit και Robot,
<https://revitstructureblog.wordpress.com/2015/07/30/revit-2016-to-autodesk-robot-structural-analysis-professional-2016-new-bi-directional-load-transfer/>

3.3.2 Robot Structural Analysis Professional

Το πρόγραμμα *Robot Structural Analysis Professional* της εταιρείας *Autodesk* αποτελεί ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα στηριζόμενο στην τεχνολογία BIM, καθώς επιτρέπει την ψηφιακή απεικόνιση και την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής τους. Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατή η άμεση συνεργασία με τα άλλα προγράμματα και η αποτελεσματική ανάλυση κάθε είδους μοντέλου. Το λογισμικό αυτό δίνει την δυνατότητα για την σχεδίαση ενός μοντέλου από την αρχή, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την εισαγωγή μιας κατασκευής αποθηκευμένης στο πρόγραμμα Revit, μία διαδικασία που ακολουθήθηκε και στην συγκεκριμένη μελέτη.

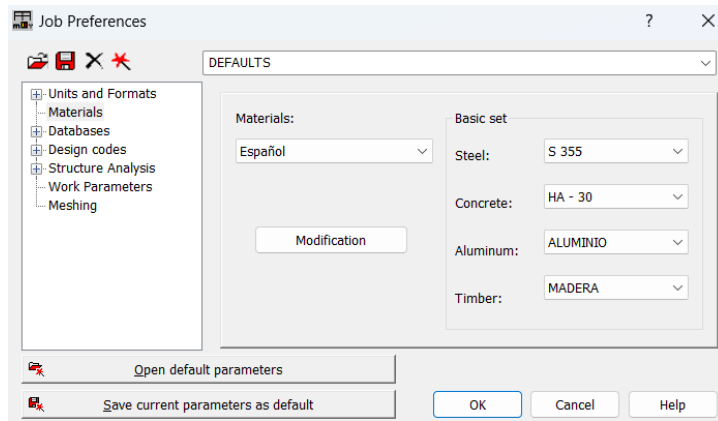
Επιπρόσθετα, στο Robot είναι δυνατή η σχεδίαση ενός μοντέλου μέσω πεπερασμένων στοιχείων τα οποία μαζί με μη-γραμμικούς αλγόριθμους βοηθούν στην άρτια ανάλυσή του. Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες του προγράμματος είναι τα εργαλεία που προσφέρει κατά τη σχεδίαση, χωρίς να απαιτείται κάποια προηγούμενη εμπειρία του μηχανικού με προγραμματιστικά λογισμικά. Για τον σχεδιασμό μιας κατασκευής μπορούν να χρησιμοποιηθεί η δομή έτοιμων μοντέλων τα οποία περιέχει το *Robot*. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα σχεδίασης ενός δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα και από χάλυβα και η τήρηση των ισχυόντων κανονισμών κάθε χώρας, μέσω της εντολής *Job Preferences*. Συνεπώς, υπάρχει μεγάλη ποικιλία για την επιλογή των κατάλληλων δομικών στοιχείων και η δυνατότητα σχεδίασης με βάσει τις μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται σε κάθε χώρα.

Αφού, λοιπόν, το μοντέλο σταλθεί από το *Revit* στο *Robot* μπορούμε να επεξεργαστούμε καλύτερα τα δομικά στοιχεία του κτιρίου και να διατασιολογήσουμε τα μέλη του. Συγκεκριμένα, η δημιουργία πλαισίων ροπής κατά τις διευθύνσεις X και Y εξασφαλίζεται μέσω της εντολής *fixed releases*. Οι δευτερεύουσες δοκοί και οι σύμμικτες πλάκες δεν περάστηκαν στο μοντέλο, αλλά προστέθηκαν στη συνέχεια τα φορτία από το ίδιο βάρος τους στο φορέα. Επίσης, προσθέτουμε τις πακτώσεις και προσθέτουμε τη διαφραγματική λειτουργία της πλάκας μέσω της εντολής *rigid links*.

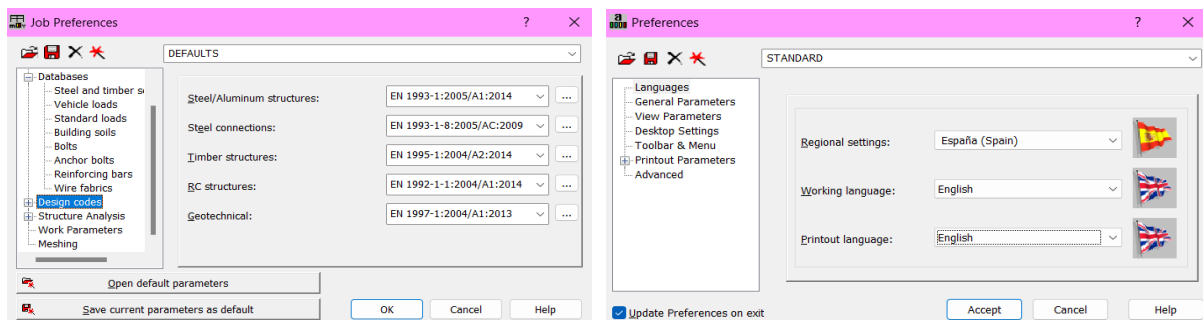


Σχήμα 3-6: Η εισαγωγή του φορέα στο περιβάλλον του Robot

Ακολουθώντας, είναι σημαντικό να ρυθμίσουμε στο πρόγραμμα τις διατάξεις που ισχύουν πριν προσθέσουμε τα φορτία, ώστε να βγάλουμε σωστά αποτελέσματα. Εφόσον η κατασκευή βρίσκεται στην Ισπανία, οφείλουμε να εφαρμόσουμε τους κανονισμούς του Ευρωκώδικα που ισχύουν για την χώρα αυτή μέσω της εντολής *Job Preferences* και *Preferences*, όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 3-7.



(α)



(β)

(γ)

Σχήμα 3-7: Η εισαγωγή των (α) δεδομένων των υλικών και των (β) διατάξεων των Ευρωκωδίκων (γ) στην Ισπανία

Εκτός από το γεωμετρικό σχεδιασμό του κτιρίου γραφείων, πραγματοποιήθηκε και η φωτορεαλιστική απεικόνισή του μέσω του προγράμματος *Enscape* το οποίο συνεργάζεται άμεσα με το *Revit*.



Σχήμα 3-8: Φωτορεαλιστική απεικόνιση κτιρίου γραφείων

4 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Το σύνολο των φορτίων που καταπονούν την πραγματική κατασκευή καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της, από την κατασκευή έως τη λειτουργία και τη συντήρησή της, υπολογίζονται με βάση τον Ευρωκώδικα 1 και έπειτα επιβάλλονται μέσω του προγράμματος στο προσομοίωμα του κτιρίου. Παρά το γεγονός ότι οι δράσεις που ασκούνται επί της κατασκευής δεν μπορούν να προσδιοριστούν με απόλυτη ακρίβεια, ο Ευρωκώδικας με τα παραρτήματα και τα Εθνικά Προσαρτήματα που περιλαμβάνει στοχεύει στον όσο το δυνατόν καλύτερο και πιο ρεαλιστικό υπολογισμό τους. Συγκεκριμένα, όλες οι φορτίσεις της κατασκευής κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις (4) υποκατηγορίες:

- Μόνιμα Φορτία
- Ίδιο βάρος κατασκευής
- Πρόσθετα μόνιμα φορτία
- Κινητά Φορτία
- Επιβαλλόμενα φορτία
- Φορτία ανέμου
- Φορτία χιονιού
- Φορτία λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών
- Σεισμικά Φορτία
- Τυχηματικά Φορτία (τα οποία δεν λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα εργασία)

4.1 Μόνιμα Φορτία

Τα μόνιμα φορτία (*Dead Loads*) αφορούν όλες τις δυνάμεις οι οποίες ασκούνται επί της κατασκευής για τις οποίες το μέγεθός τους παραμένει αμετάβλητο στη διάρκεια του χρόνου. Ειδικότερα, μόνιμα φορτία αποτελούν το ίδιο βάρος όλων των φέροντων και των μη φέροντων στοιχείων. Στα μόνιμα φορτία συμπεριλαμβάνονται και το ίδιο βάρος της σύμμικτης πλάκας και των σύμμικτων δοκών, τα οποία υπολογίζονται παρακάτω μαζί με τη διαστασιολόγησή τους.

Ίδιο βάρος φέροντων στοιχείων

Εδώ υπολογίζεται το συνολικό βάρος του μεταλλικού σκελετού της κατασκευής, δηλαδή όλων των δοκών και των υποστυλωμάτων. Το ολικό αυτό κατακόρυφο φορτίο υπολογίζεται άμεσα από το πρόγραμμα Robot (DL₁).

Ίδιο βάρος μη φέροντων στοιχείων

Στα μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής περιλαμβάνονται οι χρησιμοποιούμενοι υαλοπίνακες, οι σκάλες και η περιμετρική κάλυψη του κλιμακοστασίου.

- *Υαλοπίνακες*

Για την κάλυψη των εξωτερικών όψεων του κτιρίου επιλέχθηκε γυάλινο πλαίσιο με σκληρυμένο διαφανές τζάμι με σκοπό την αρχιτεκτονική αισθητική, καθώς και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της κατασκευής. Επιλέχθηκε διπλό πλαίσιο από γυαλί με πάχος 4 mm και ενδιάμεσο κενό 20 mm, το οποίο απορροφά την θερμότητα και επιτρέπει την εισχώρηση αρκετού φυσικού φωτός από το εξωτερικό περιβάλλον. Το βάρος του γυάλινου πλαισίου ανέρχεται στα 20 kg/m², δηλαδή 0.20 kN/m².



Σχήμα 4-1: Η επιλογή της κατάλληλης υαλοπρόσοψης για την εφαρμογή του υαλοπίνακα, [25]

Πίνακας 4-1: Τα διάφορα βάρη για κάθε τύπο υαλοπίνακα

Weight of double glazed units

The thickness of some typical double glass are as follows:

- Double glass, 4/20/4mm : 20 kg/m²
- Double glass, 6/16/6mm : 30 kg/m²
- Double glass, 8/16/8mm : 40 kg/m²
- Laminated double glass, 6/16/8.8mm: 35 kg/m²

- *Σκάλες*

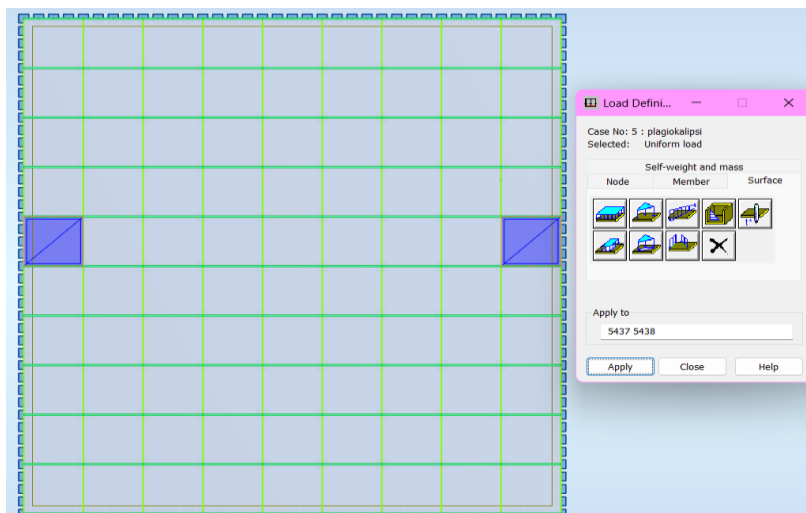
Συνολικά σχεδιάστηκαν δύο κλιμακοστάσια στο εσωτερικό του κτιρίου. Οι σκάλες κάθε κλιμακοστασίου είναι ευθύγραμμες από αλουμίνιο και ενώνονται σε κάθε όροφο μέσω πλατύσκαλου. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το προσχεδιασμένο σύστημα κλιμάκων SP200 της εταιρείας SteelPro, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-2 η οποία έχει εξαιρετικά μικρό ίδιο βάρος, 150 kg/m ή 0.17 kN/m², με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται σε όλους τους ορόφους του κτιρίου με αρκετά μεγάλη ευκολία.



Σχήμα 4-2: Σύστημα κλιμάκων SP200, [34]

- Πλαγιοκάλυψη ανελκυστήρα

Ο ανελκυστήρας καλύπτεται περιμετρικά με τοιχία πάχους 20 mm τα οποία φέρουν φορτίο: $25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.020 \text{ m} = 0.5 \text{ kN/m}^2$



Σχήμα 4-3: Η επιλογή των δύο χώρων στους οποίους θα σχεδιαστεί το κλιμακοστάσιο

Πρόσθετα μόνιμα φορτία

Για την επικάλυψη της στέγης, επιλέχθηκαν από την Εικόνα χαλυβδόφυλλα με διαστάσεις $4000 \times 2000 \text{ mm}^2$ και πάχους 3 mm τα οποία προκαλούν πρόσθετο μόνιμο φορτίο ίσο με 0.2 kN/m^2 (DL_2). Στους εσωτερικούς ορόφους λαμβάνονται υπόψη πρόσθετα φορτία λόγω επικαλύψεων και ψευδοροφών με τιμή 1.0 kN/m^2 (DL_3).

Πίνακας 4-2: Οι τιμές των πρόσθετων μόνιμων φορτίων για τις διάφορες επιφάνειες του χαλυβδόφυλλου

Length x Width mm	Thickness mm	Mass per Sq m Kg/m ²	Length x Width mm	Thickness mm	Mass per Sq m Kg/m ²
2000 x 1000	3	23.55	2000 x 1000	30.00	235.50
2500 x 1250	3	23.55	2500 x 1250	30.00	235.50
3000 x 1500	3	23.55	3000 x 1500	30.00	235.50
3660 x 1830	3	23.55	4000 x 2000	30.00	235.50
4000 x 2000	3	23.55	5000 x 1250	30.00	235.50
2000 x 1000	4	31.40	5000 x 2500	30.00	235.50
2500 x 1250	4	31.40	6000 x 2500	30.00	235.50
3000 x 1500	4	31.40	10000 x 2500	30.00	235.50
3660 x 1830	4	31.40	2000 x 1000	32.00	251.20
2000 x 1000	5	39.25	2500 x 1250	32.00	251.20
2500 x 1250	5	39.25	3000 x 1500	32.00	251.20
3000 x 1500	5	39.25	4000 x 2000	32.00	251.20
3660 x 1830	5	39.25	5000 x 2500	32.00	251.20
4000 x 1750	5	39.25	2500 x 1250	35.00	274.75
4000 x 1830	5	39.25	3000 x 1500	35.00	274.75
4000 x 2000	5	39.25	4000 x 2000	35.00	274.75
6000 x 2000	5	39.25	2000 x 1000	40.00	314.00
2500 x 1250	6	47.10	2500 x 1250	40.00	314.00
3000 x 1500	6	47.10	3000 x 1500	40.00	314.00
3000 x 1525	6	47.10	4000 x 1750	40.00	314.00
3660 x 1830	6	47.10	4000 x 2000	40.00	314.00
4000 x 1750	6	47.10	5000 x 2500	40.00	314.00
4000 x 1830	6	47.10	6000 x 2000	40.00	314.00
4000 x 2000	6	47.10	7500 x 2500	40.00	314.00

4.2 Κινητά Φορτία

Τα κινητά φορτία είναι οριζόντιες και κατακόρυφες δράσεις, ομοιόμορφα κατανεμημένες, οι οποίες ενεργούν μετά το τέλος κατασκευής του έργου και δεν έχουν σταθερό μέτρο. Δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της ακριβούς τιμής τους ή της θέσης στην οποία επιβάλλονται. Αντίθετα, οι τιμές τους προδιαγράφονται από τους ισχύοντες Κανονισμούς. Σε αυτά τα φορτία περιλαμβάνονται τα επιβαλλόμενα φορτία που δρουν στην κατασκευή κατά τη λειτουργία της, τα φορτία λόγω ανέμου και λόγω χιονιού.

4.2.1 Επιβαλλόμενα Φορτία

Κατά τη λειτουργία της κατασκευής, ασκούνται διαφορετικές δράσεις, μεταβλητής τιμής, οι οποίες οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα και σε αντικείμενα μη σταθερά τα οποία μετακινούνται ή μεταβάλλονται στον χρόνο. Με βάση τον τρόπο χρήσης του έργου, τα επιβαλλόμενα αυτά φορτία αναγράφονται σε πίνακες στον Ευρωκώδικα.

Πίνακας 4-3: Η κατηγοριοποίηση των κτιρίων ανάλογα με τη χρήση τους

Κατηγορία	Συγκεκριμένη Χρήση	Παράδειγμα
A	Χώροι διαμονής	Δωμάτια σε κτήρια κατοικιών και σπίτια. Θάλαμοι και πτέρυγες σε νοσοκομεία. Υπνοδωμάτια σε ξενοδοχεία και ξενώνες, κουζίνες και τουαλέτες.
B	Χώροι γραφείων	
C	Χώροι στους οποίους οι άνθρωποι μπορεί να συναθροισθούν (με εξαίρεση τους χώρους που κατατάσσονται στις κατηγορίες A,B, και D¹⁾)	C1: Χώροι με τραπέζια κλπ. Π.χ. σχολικοί χώροι, νηπιαγωγεία, καφενεία, εστιατόρια, αίθουσες φαγητού, αναγνωστήρια, χώροι υποδοχής. C2: Χώροι με σταθερά καθίσματα, Π.χ. χώροι σε εκκλησίες, θέατρα ή κινηματογράφους, αίθουσες συνεδριάσεων, αίθουσες ομιλίας, αίθουσες συγκεντρώσεων, χώροι αναμονής, χώροι αναμονής σε σιδηροδρομικούς σταθμούς. C3: Χώροι χωρίς εμπόδια στη διακίνηση του κοινού, π.χ. χώροι σε μουσεία, εκθεσιακοί χώροι, κλπ. και χώροι πρόσβασης σε δημόσια και διοικητικά κτήρια, ξενοδοχεία και νοσοκομεία. Προαύλια σιδηροδρομικών σταθμών. C4: Χώροι για πιθανές σωματικές δραστηριότητες, π.χ. αίθουσες χορού, αίθουσες γυμναστικής και θεατρικές σκηνές C5: Χώροι προσβάσιμοι από μεγάλα πλήθη, π.χ. για δημόσιες εκδηλώσεις όπως αίθουσες συναυλιών, κλειστά γήπεδα, εξέδρες γηπέδων, εξώστες και χώροι πρόσβασης, πλατφόρμες σιδηροδρόμων.
D	Χώροι με εμπορικά καταστήματα	D1: Χώροι σε καταστήματα λιανικής πώλησης, γενικά D2: Χώροι σε πολυκαταστήματα
¹⁾ Εφιστάται η προσοχή στο 6.3.1.1(2), και συγκεκριμένα για το C4 και C5. Βλέπε EN 1990 στην περίπτωση που πρέπει να εξετασθούν οι δυναμικές επιδράσεις. Για την Κατηγορία E, βλέπε πίνακα 6.3		
ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1 Βλέπε 6.3.2 για αποθήκευση ή βιομηχανικές δραστηριότητες.		

Πίνακας 4-4: Οι τιμές των επιβαλλόμενων φορτίων σε δάπεδα, εξώστες και κλίμακες ανάλογα με την κατηγορία του κτιρίου

Κατηγορίες φορτιζόμενων επιφανειών	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Κατηγορία A και Κατηγορία B		
-Δάπεδα	2,0	2,0
-Σκάλες	3,5	2,0
-Μπαλκόνια	5,0	3,0
Κατηγορία C		
-C1	3,0	3,0
-C2	5,0	4,0
-C3	5,0	4,0
-C4	5,0	4,0
-C5	7,5	4,5
Κατηγορία D		
-D1	5,0	4,0
-D2	5,0	4,0

Εφόσον στο δάπεδο ασκούνται διαφορετικά κατανεμημένα φορτία κινητών χωρισμάτων, το ίδιο βάρος τους λαμβάνεται ως ένα ισοδύναμο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο q_k το οποίο λαμβάνει τις εξής τιμές:

Για μετακινήσιμα χωρίσματα με ίδιο βάρος ≤ 1.0 kN/m μήκους τοίχου: $q_k = 0.5$ kN/m².

Για μετακινήσιμα χωρίσματα με ίδιο βάρος > 1.0 kN/m και ≤ 2.0 kN/m μήκους τοίχου: $q_k = 0.8$ kN/m².

Για μετακινήσιμα χωρίσματα με ίδιο βάρος > 2.0 kN/m και ≤ 3.0 kN/m μήκους τοίχου: $q_k = 1.2$ kN/m².

Πίνακας 4-5: Οι τιμές των επιβαλλόμενων φορτίων ανάλογα με τον τύπο στέγης

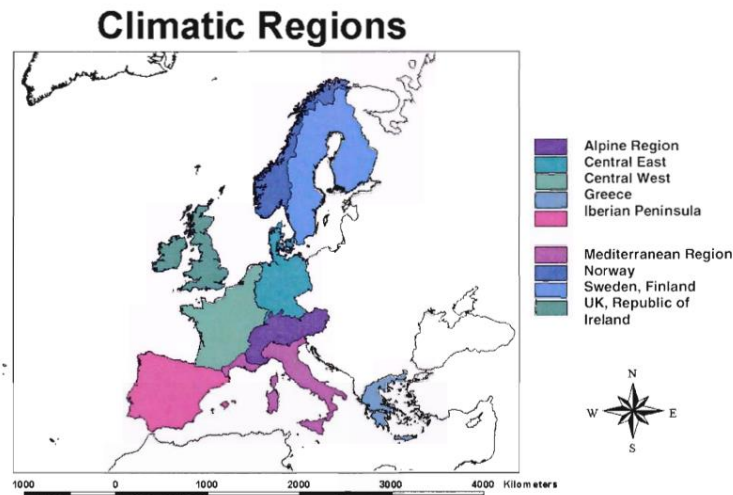
Στέγη (κλίση < 20°)	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Κατηγορία Η	0,5	1,0
ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Το q_k μπορεί να θεωρηθεί ότι δρα είτε σε όλη τη στέγη είτε σε ένα τμήμα της στέγης εμβαδού, πάντως όχι μικρότερου, των 10m ² .		

Η συγκεκριμένη κατασκευή αποτελεί κτίριο γραφείων, οπότε σύμφωνα με τον Πίνακα κατατάσσεται στην κατηγορία Β και η στέγη θεωρείται μη προσβάσιμη, οπότε ανήκει στην κατηγορία Η. Τα επιβαλλόμενα επιφανειακά φορτία λαμβάνουν τις τιμές του Πίνακα, όπως ορίζονται από το Εθνικό Προσάρτημα του Ευρωκώδικα 1. Επίσης, για τα δάπεδα λήφθηκε υπόψη ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο $q_k = 0.5 \text{ kN/m}^2$ λόγω των μετακινήσιμων χωρισμάτων. Τελικά, στα δάπεδα επιβάλλεται φορτίο 2.5 kN/m^2 , στη στέγη 0.5 kN/m^2 και στις σκάλες 3.5 kN/m^2 .

4.2.2 Φορτίο χιονιού

Το φορτίο του χιονιού, το οποίο ασκείται επί της στέγης του κτιρίου, θεωρείται μεταβλητό φορτίο. Το μέγεθος της δράσης αυτής είναι μεταβλητό ως προς τον χρόνο. Σε πολλές περιπτώσεις είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η ένταση του ανέμου που μπορεί να προκαλέσει ανακατανομή του χιονιού ως προς την επιφάνεια την οποία έχει καλύψει.

Το φορτίο του χιονιού είναι κατακόρυφο και το μέτρο του υπολογίζεται όπως προδιαγράφεται από τους κανονισμούς του Ευρωκώδικα EN 1991-1-3-[11], λαμβάνοντας ως παραμέτρους το υψόμετρο της κατασκευής, την κλίση και το υλικό της στέγης. Η κατασκευή βρίσκεται στην Ισπανία και συγκεκριμένα στη Μαδρίτη, οπότε αποτελεί τμήμα της Ιβηρικής Χερσονήσου.



Σχήμα 4-4: Η διακριτοποίηση των χωρών με βάση το κλίμα τους

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4-6, η χαρακτηριστική τιμή s_k του φορτίου του χιονιού επάνω στο έδαφος για μία περιοχή που ανήκει στην Ιβηρική Χερσόνησο δίνεται από την Εξίσωση (4-1):

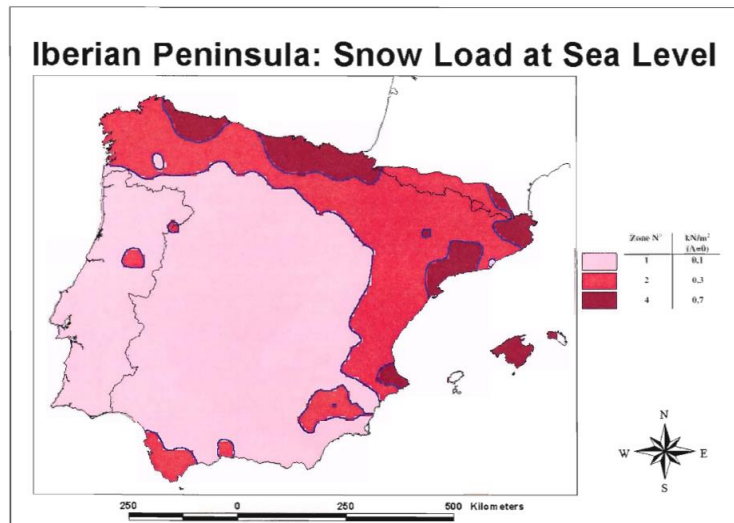
$$s_k = (0.190Z - 0.095) \left[1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right] \quad (4-1)$$

όπου: η παράμετρος A αναφέρεται στο υψόμετρο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, ενώ η παράμετρος Z στο νούμερο της ζώνης.

Πίνακας 4-6: Οι διάφοροι τύποι υπολογισμού του φορτίου του χιονιού ανάλογα την περιοχή

<i>Climatic Region</i>	<i>Expression</i>
Alpine Region	$s_k = (0,642Z + 0,009) \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right]$
Central East	$s_k = (0,264Z - 0,002) \left[1 + \left(\frac{A}{256} \right)^2 \right]$
Greece	$s_k = (0,420Z - 0,030) \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right]$
Iberian Peninsula	$s_k = (0,190Z - 0,095) \left[1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right]$
Mediterranean Region	$s_k = (0,498Z - 0,209) \left[1 + \left(\frac{A}{452} \right)^2 \right]$
Central West	$s_k = 0,164Z - 0,082 + \frac{A}{966}$
Sweden, Finland	$s_k = 0,790Z + 0,375 + \frac{A}{336}$
UK, Republic of Ireland	$s_k = 0,140Z - 0,1 + \frac{A}{501}$

Το κτίριο των γραφείων βρίσκεται στην περιοχή Arteixo, στην βορειοδυτική πλευρά της Ισπανίας. Συγκεκριμένα, η Ιβηρική Χερσόνησος χωρίζεται σε ζώνες όπως φαίνεται στην Εικόνα και αντίστοιχα λαμβάνεται η τιμή $s_{k,0}$ του χαρακτηριστικού φορτίου χιονιού σε έδαφος που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας, δηλαδή ισχύει $A = 0$.



Σχήμα 4-5: Οι ζώνες της Ιβηρικής Χερσονήσου

Τελικά λαμβάνεται η τιμή $s_{k,0} = 0.3 \text{ kN/m}^2$ και ως ζώνη λαμβάνεται η δεύτερη, δηλαδή ισχύει ότι $Z = 2$. Το κτίριο έχει υψόμετρο 24 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Ωστόσο, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς το υψόμετρο A υπολογίζεται με ακρίβεια 100 m, οπότε λαμβάνεται η τιμή $A = 100 \text{ m}$. Άρα, το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού ισούται με:

$$s_k = (0.190Z - 0.095) \left[1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right] = (0.190 \cdot 2 - 0.095) \left[1 + \left(\frac{100}{524} \right)^2 \right] = 0.30 \text{ kN/m}^2 \quad (4-2)$$

Το φορτίο χιονιού s το οποίο δρα επί της στέγης είναι κατακόρυφο και υπολογίζεται ως εξής:

Για καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια ή παροδικές καταστάσεις:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (4-3)$$

Για τυχηματικές καταστάσεις:

$$s = \mu_i C_e C_t s_{Ad} \quad (4-4)$$

Όπου:

μ_i : ο συντελεστής σχήματος του φορτίου χιονιού

s_k : η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους

s_{Ad} : η τιμή σχεδιασμού του φορτίου χιονιού επί του εδάφους για την τυχηματικές καταστάσεις

C_e : ο συντελεστής έκθεσης, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 0.8 για κτίριο εκτεθειμένο σύμφωνα με τον Πίνακα (4-7)

Πίνακας 4-7: Οι τιμές του συντελεστή έκθεσης C_e

Topography	C_e
Windswept ^a	0,8
Normal ^b	1,0
Sheltered ^c	1,2

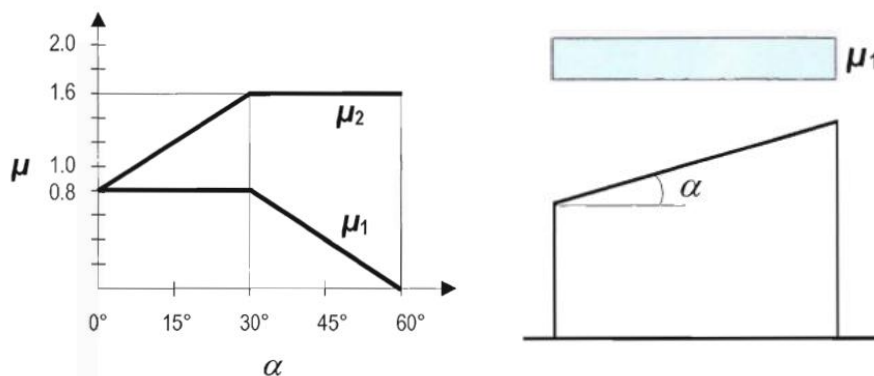
^a *Windswept topography*: flat unobstructed areas exposed on all sides without, or little shelter afforded by terrain, higher construction works or trees.

^b *Normal topography*: areas where there is no significant removal of snow by wind on construction work, because of terrain, other construction works or trees.

^c *Sheltered topography*: areas in which the construction work being considered is considerably lower than the surrounding terrain or surrounded by high trees and/or surrounded by higher construction works.

C_t : ο θερμικός συντελεστής, για κανονικές συνθήκες θερμομόνωσης της στέγης λαμβάνεται ίσος με 1

Το χιόνι έχει ομοιόμορφη κατανομή επί της στέγης. Στη συγκεκριμένη κατασκευή έχουμε μονόκλινη στέγη με γωνία κλίσης $\alpha = 0^\circ$, οπότε ο συντελεστής σχήματος φορτίου χιονιού λαμβάνει την τιμή $\mu = 0.8$, σύμφωνα με το Σχήμα. Επίσης, η τιμή του παραμένει σταθερή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-6: Τα διαγράμματα υπολογισμού του συντελεστή σχήματος φορτίου χιονιού μ

Επομένως, τελικά το ομοιόμορφο επιφανειακό φορτίο χιονιού επί της στέγης υπολογίζεται ως εξής:

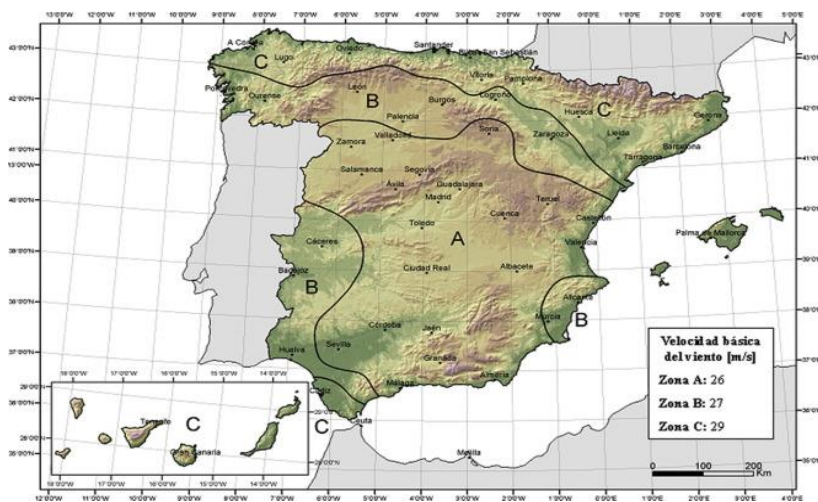
$$s = 0.8 \cdot 0.8 \cdot 1 \cdot 0.30 = 0.19 \text{ kN/m}^2 \quad (4-5)$$

Προκειμένου να εισάγουμε αυτό το φορτίο χιονιού στην κατασκευή μέσω του προγράμματος Robot, τοποθετούμε αρχικά claddings στην οροφή του κτιρίου.

4.2.3 Φορτίο ανέμου

Οι δράσεις που προκαλεί ο άνεμος στις κατασκευές από χάλυβα είναι εξαιρετικά σημαντικές και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν ως κύρια φόρτιση. Η τιμή τους είναι μεταβλητή στον χρόνο και εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι η τοποθεσία της κατασκευής, το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται, οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα κλπ. Τα φορτία του ανέμου επιδρούν άμεσα πάνω στην κατασκευή ως πιέσεις στις εξωτερικές επιφάνειες και έμμεσα στις εσωτερικές επιφάνειες του κτιρίου, εξαιτίας της πορώδους συμπεριφοράς των εξωτερικών. Λόγω του συνόλου των πιέσεων αυτών, αναπτύσσονται δυνάμεις κάθετες στις επιφάνειες του κτιρίου. Οι χαρακτηριστικές τιμές των μεταβλητών δράσεων του ανέμου ορίζονται στις διατάξεις του Ευρωκώδικα EN 1991-1-4-[12].

Απαραίτητη προϋπόθεση για τον προσδιορισμό των φορτίων του ανέμου είναι ο υπολογισμός της βασικής ταχύτητας ανέμου, η οποία εξαρτάται από την τοποθεσία του έργου. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, η περιοχή στην οποία βρίσκεται η υπό μελέτη κατασκευή ανήκει στην ζώνη C, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7: Η θεμελιώδης ταχύτητα ανέμου στις διάφορες ζώνες της Ισπανίας, <https://laureamiro.com/esp/2012/04/luchando-contra-mapas-viento-espanoles/>

Η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου είναι ίση με: $v_{b,0} = 29 \text{ m/s}$.

Βασική ταχύτητα ανέμου

Η βασική ταχύτητα ανέμου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} = 1.0 \cdot 1.0 \cdot 29 = 29 \text{ m/s} \quad (4-6)$$

όπου:

C_{dir} : ο συντελεστής διεύθυνσης, ο οποίος σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα παίρνει την τιμή 1.0,

C_{season} : ο εποχικός συντελεστής, ο οποίος σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα παίρνει την τιμή 1.0

Μέση ταχύτητα ανέμου

Η μέση ταχύτητα ανέμου ως συνάρτηση του ύψους z υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (4-7)$$

όπου:

$c_r(z)$: ο συντελεστής τραχύτητας εδάφους

$c_0(z)$: ο συντελεστής αναγλύφου του εδάφους ο οποίος παίρνει την τιμή 1.0

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας εδάφους $c_r(z)$ λαμβάνουμε την εξίσωση:

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), & \text{για } z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r \cdot z_{min}, & \text{για } z \leq z_{min} \end{cases} \quad (4-8)$$

Όπου ο συντελεστής εδάφους ισούται με:

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \quad (4-9)$$

Πίνακας 4-8: Οι τιμές των συντελεστών ύψους ανάλογα την κατηγορία εδάφους

Κατηγορία εδάφους	z_0 m	z_{min} m
0 Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0,003	1
I Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0,01	1
II Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0,05	2
III Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0,3	5
IV Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m.	1,0	10

Το κτίριο των γραφείων της συγκεκριμένης μελέτης κατατάσσεται στην κατηγορία εδάφους III: $z_0 = 0.3$ m, $z_{min} = 5$ m.

Από την κατηγορία εδάφους παίρνουμε την τιμή: $z_{0,II} = 0.05$ m. Επίσης, ορίζεται ως $z_{max} = 200$ m.

Για το κτίριο έχουμε: $z_e = h = 27$ m, αφού $b = 93$ m > $h = 27$ m.

Άρα, για $z_{min} \leq z \leq z_{max}$:

$$c_r(z_e) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.97 \quad (4-10)$$

όπου $k_r = 0.215$

Τελικά, υπολογίζουμε την μέση ταχύτητα ανέμου η οποία ισούται με: $v_m(z_e) = 28.13$ m/s

Στροβιλισμός ανέμου

Η ένταση του στροβιλισμού ανέμου προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$I_v(z_e) = \frac{k_t}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)} = 0.22, \text{ για } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4-11)$$

όπου:

k_1 : ο συντελεστής στροβιλισμού ο οποίος είναι ίσος με 1.0

$c_0(z)$: ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης ο οποίος είναι ίσος με 1.0

z_0 : το μήκος τραχύτητας

Πίεση ταχύτητας αιχμής

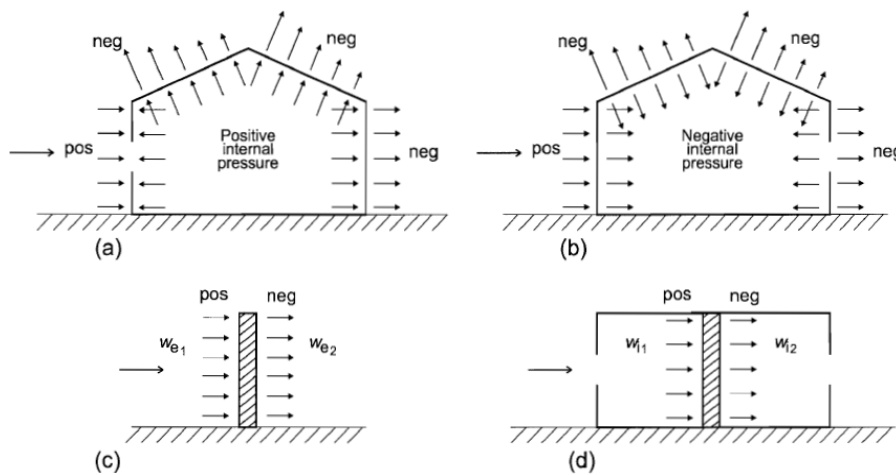
Η πίεση ταχύτητας αιχμής ισούται με:

$$q_p(z_e) = [1 + 7 \cdot I_v(z_e)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z_e) = 1.26 \text{ kPa} \quad (4-12)$$

όπου:

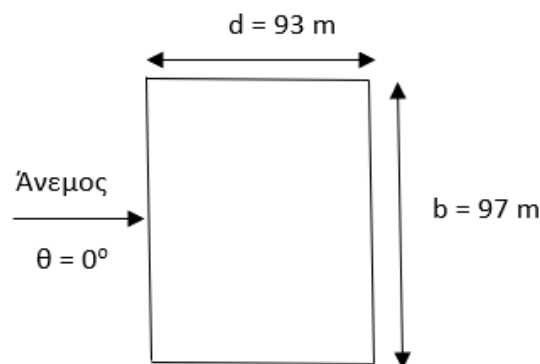
ρ : η πυκνότητα του αέρα η οποία σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα είναι ίση με 1.25 kg/m^3 .

Οι συνολικές πιέσεις ανέμου επί της κατασκευής θα υπολογιστούν για διεύθυνση ανέμου με $\theta = 0^\circ$ και με $\theta = 90^\circ$.



Σχήμα 4-8: Οι θετικές και αρνητικές πιέσεις ανέμου για τις διάφορες διευθύνσεις του

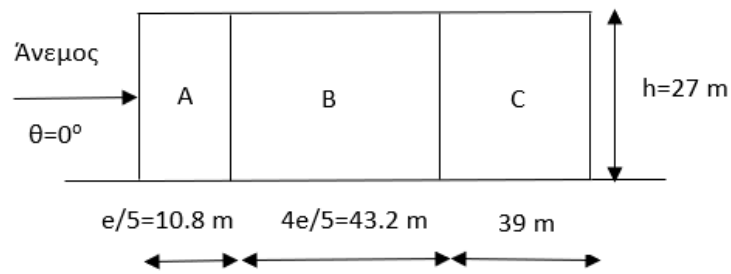
Για διεύθυνση ανέμου $\theta = 0^\circ$



Σχήμα 4-9: Εφαρμογή φορτίου ανέμου για διεύθυνση $\theta=0^\circ$

Κατακόρυφοι στύλοι:

$$e = \min(b; 2h) = \min(97; 54) = 54 \text{ m} < d = 93 \text{ m} \rightarrow 3 \text{ ζώνες A, B, C} \quad (4-13)$$



Σχήμα 4-10: Χωρισμός των επιφανειών των κατακόρυφων στύλων σε ζώνες για διεύθυνση ανέμου $\theta=0^\circ$

$$E_A = 10.8 \cdot 27 = 291.6 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_B = 43.2 \cdot 27 = 1166.4 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_C = 39 \cdot 27 = 1053 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \quad \rightarrow C_{pe} = C_{pe,10}$$

$$E_D = 93 \cdot 27 = 2511 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_E = 93 \cdot 27 = 2511 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

Για $h/d = 0.29$ ισχύει:

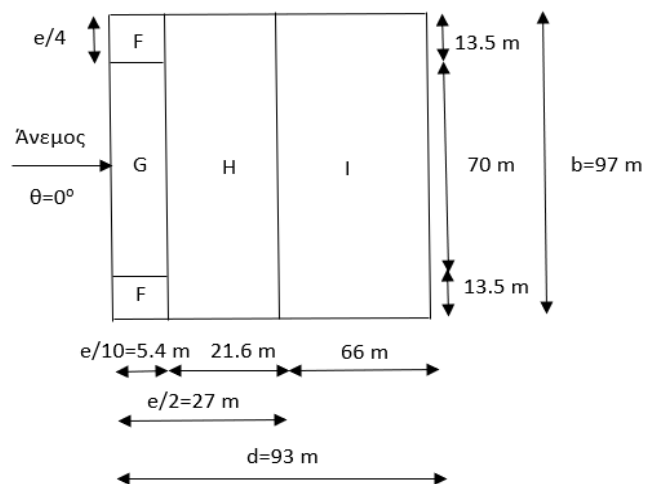
Πίνακας 4-9: Οι τιμές του συντελεστή εξωτερικής πίεσης του υπήνεμου τοίχου σε κάθε ζώνη

h/d-ΖΩΝΕΣ	A	B	C	D	E
5	-1.2	-0.8	-0.5	+0.8	-0.7
1	-1.2	-0.8	-0.5	+0.8	-0.5
≤ 0.25	-1.2	-0.8	-0.5	+0.7	-0.3
0.29	-1.2	-0.8	-0.5	+0.71	-0.31

Στέγη: Έχουμε επίπεδη στέγη με αιχμηρά άκρα και με $-5^\circ < \alpha < 5^\circ$ ($\alpha = 0^\circ$)

$$e = \min(b ; 2h) = \min(97 ; 54) = 54 \text{ m} < d = 93 \quad (4.14)$$

Άρα, χωρίζουμε σε ζώνες όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-11.



Σχήμα 4-11: Χωρισμός των επιφανειών της στέγης σε ζώνες για διεύθυνση ανέμου $\theta=0^\circ$

Πίνακας 4-10: Οι τιμές του συντελεστή εξωτερικής πίεσης c_{pe} για κάθε ζώνη

ΖΩΝΗ	F	G	H	I
$c_{pe,10}$	-1.8	-1.2	-0.7	±0.2
$c_{pe,1}$	-2.5	-2.0	-1.2	

$$E_F = 13.5 \cdot 5.4 = 72.9 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_G = 70 \cdot 5.4 = 378 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \quad \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10}$$

$$E_H = 21.6 \cdot 97 = 2095.2 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_I = 66 \cdot 97 = 6402 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

Πίνακας 4-11: Οι τιμές του τελικού συντελεστή εξωτερικής πίεσης για κάθε ζώνη των στύλων και της στέγης

ΖΩΝΗ	A	B	C	D	E	F	G	H	I
c_{pe}	-1.2	-0.8	-0.5	+0.71	-0.31	-1.8	-1.2	-0.7	±0.2

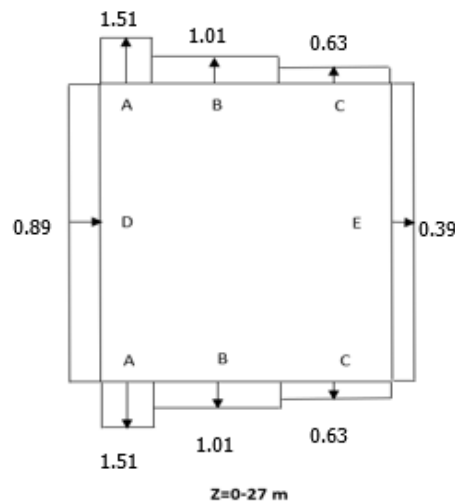
Εξωτερική πίεση

Η εξωτερική πίεση που ασκείται κάθετα στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου δίνεται από τη σχέση:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (4-15)$$

Πίνακας 4-12: Η εξωτερική πίεση για κάθε ζώνη των στύλων

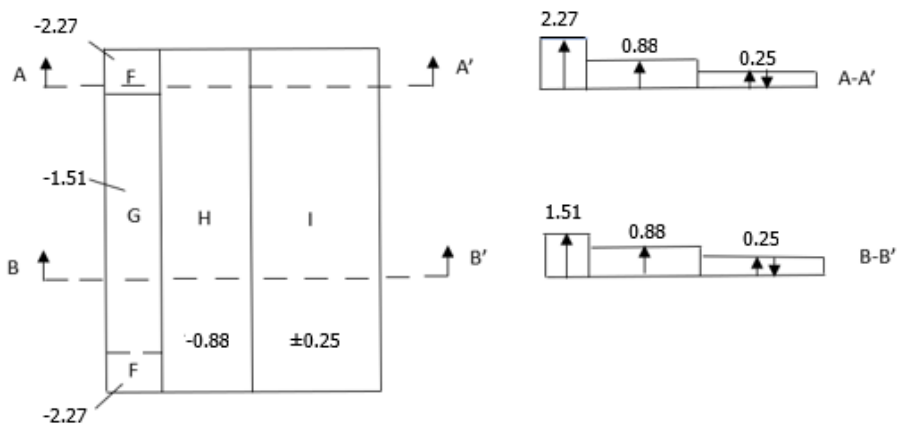
ΖΩΝΗ	A	B	C	D	E
$q_p(z_e)$	1.26				
c_{pe}	-1.2	-0.8	-0.5	+0.71	-0.31
w_e	-1.51	-1.01	-0.63	+0.89	-0.39



Σχήμα 4-12: Οι εξωτερικές πιέσεις που ασκούνται στους κατακόρυφους στύλους

Πίνακας 4-13: Η εξωτερική πίεση για κάθε ζώνη της στέγης

ΖΩΝΗ	F	G	H	I
$q_p(z_e)$	1.26			
c_{pe}	-1.80	-1.20	-0.70	±0.20
w_e	-2.27	-1.51	-0.88	±0.25



Σχήμα 4-13: Οι εξωτερικές πιέσεις που ασκούνται στη στέγη

Εσωτερική πίεση

Οι εσωτερικές πιέσεις δίνονται από τη σχέση:

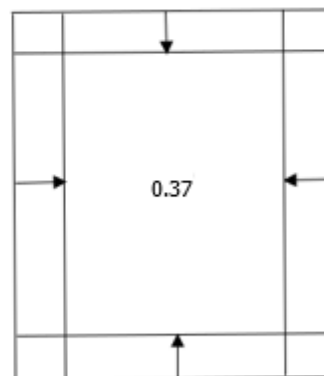
$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (4-16)$$

Θεωρώντας: $z_i = z$

$$\text{Συντελεστής εσωτερικής πίεσης για: } h/d = 27/93 = 0.29, \mu = 0.8 \rightarrow c_{pi} = -0.29 \quad (4-17)$$

Πίνακας 4-14: Η τιμή της εσωτερικής πίεσης στους σύλους και στη στέγη

Τοίχοι / στέγη	
$q_p(z_e)$	1.26
c_{pe}	-0.29
w_i	-0.37



$Z=0-27 \text{ m}$

Σχήμα 4-14: Η εσωτερική πίεση που ασκείται σε κάθε επιφάνεια

Τελικές πιέσεις w_{tot}

Η συνολικές πιέσεις του κτιρίου βρίσκονται μέσω της σχέσης:

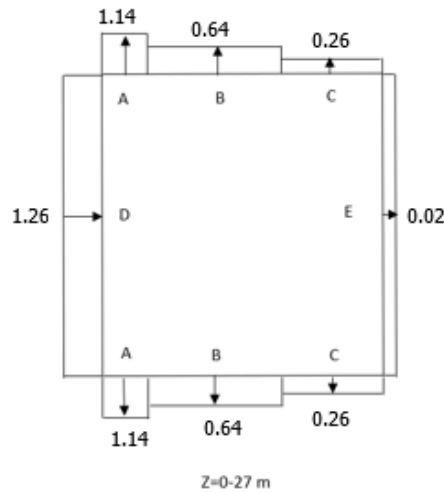
$$w_{tot} = w_e = w_i \quad (4-18)$$

Αρχικά πρέπει να βρούμε τον συνδυασμένο δυναμικό συντελεστή c_{sd} :

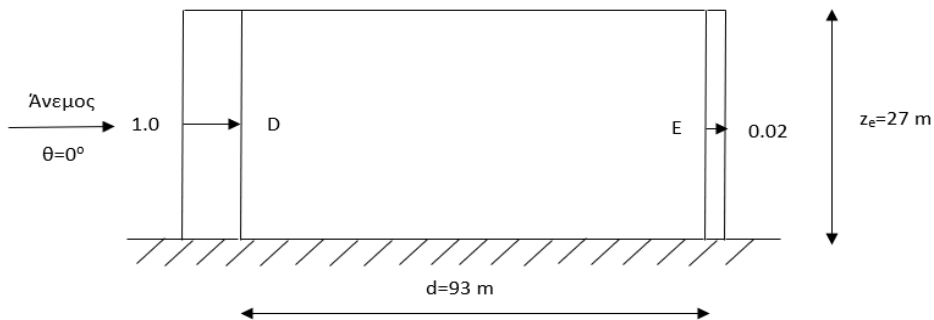
$$\eta = 27 \mu < 100 \mu, \delta = 93 \mu \rightarrow \eta < 4\delta \rightarrow c_{sd} < 0.85, \text{ λαμβάνω την τιμή } c_{sd} = 1 \quad (4.19)$$

Πίνακας 4-15: Η συνολική πίεση που ασκείται σε κάθε ζώνη των κατακόρυφων στύλων

ΖΩΝΗ	A	B	C	D	E
W_e	-1.51	-1.01	-0.63	+0.89	-0.39
W_i	-0.37				
W_{tot}	-1.14	-0.64	-0.26	+1.26	-0.02



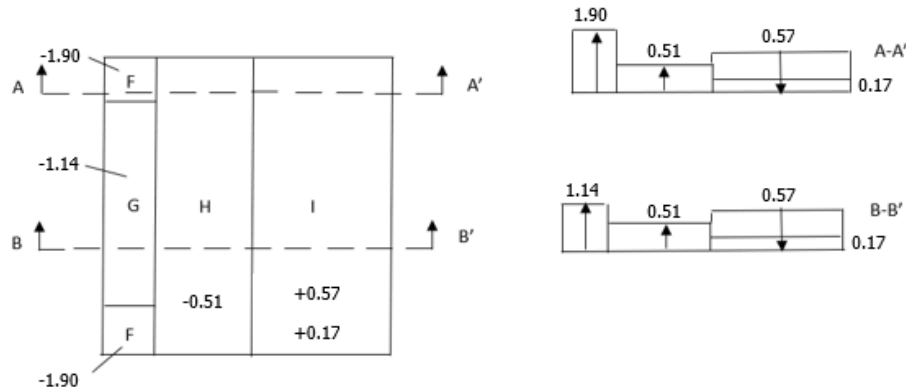
Σχήμα 4-15: Η απεικόνιση της τελικής πίεσης στους κατακόρυφους στύλους



Σχήμα 4-16: Η απεικόνιση της τελικής πίεσης για τις ζώνες D και E των στύλων για διεύθυνση ανέμου $\theta=0^\circ$

Πίνακας 4-16: Η συνολική πίεση που ασκείται σε κάθε ζώνη της στέγης

ΖΩΝΗ	F	G	H	I	
W_e	-2.27	-1.51	-0.88	± 0.2	
W_i	-0.37				
W_{tot}	-1.90	-1.14	-0.51	+0.57	+0.17



Σχήμα 4-17: Η απεικόνιση της τελικής πίεσης στη στέγη

Συνολική Δύναμη

Οι εξωτερικές δυνάμεις βρίσκονται μέσω της σχέσης:

$$F_{w,e} = c_{sCd} \cdot \Sigma w_e \cdot A_{ref} \quad (4-20)$$

Οι εσωτερικές δυνάμεις βρίσκονται μέσω της σχέσης:

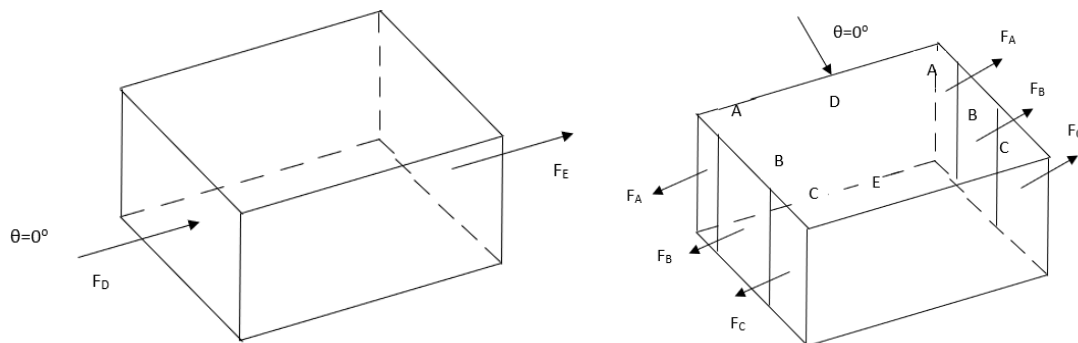
$$F_{w,i} = \Sigma w_i \cdot A_{ref} \quad (4-21)$$

Εφόσον προηγουμένως ορίσαμε τον δυναμικό συντελεστή $c_{sCd} = 1.0$, η συνισταμένη δύναμη κάθε επιφάνειας είναι ίση με:

$$F_{tot} = F_{w,e} - F_{w,i} = c_{sCd} \cdot \Sigma w_e \cdot A_{ref} - \Sigma w_i \cdot A_{ref} = A_{ref} (\Sigma w_e - \Sigma w_i) = \Sigma w \cdot A_{ref} \quad (4-22)$$

Πίνακας 4-17: Συνολική δύναμη ανέμου για διεύθυνση $\theta=0^\circ$ στις ζώνες των στύλων

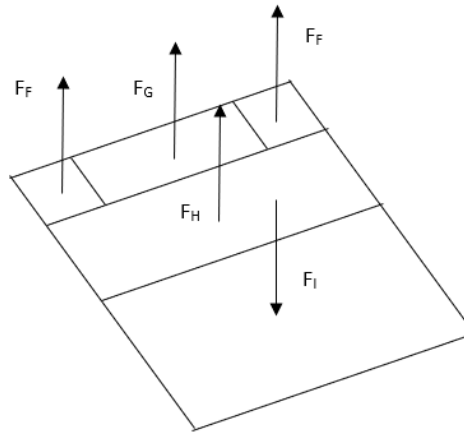
ΖΩΝΗ	A	B	C	D	E
w [kPa]	-1.14	-0.64	-0.26	+1.26	-0.02
A [m ²]	291.6	1166.4	1053	2511	2511
F [kN]	-332.42	-746.50	-273.78	+3163.86	-50.22



Σχήμα 4-18: Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων ανέμου σε κάθε ζώνη των στύλων για διεύθυνση $\theta=0^\circ$

Πίνακας 4-18: Συνολική δύναμη ανέμου για διεύθυνση $\theta=0^\circ$ στις ζώνες της στέγης

ΖΩΝΗ	F	G	H	I	
w [kPa]	-1.90	-1.14	-0.51	+0.57	+0.17
A [m ²]	72.9	378	2095.2	6402	
F [kN]	-138.51	-430.92	-1068.55	+3649.14	+1088.34



Σχήμα 4-19: Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων ανέμου σε κάθε ζώνη της στέγης για διεύθυνση $\theta=0^\circ$

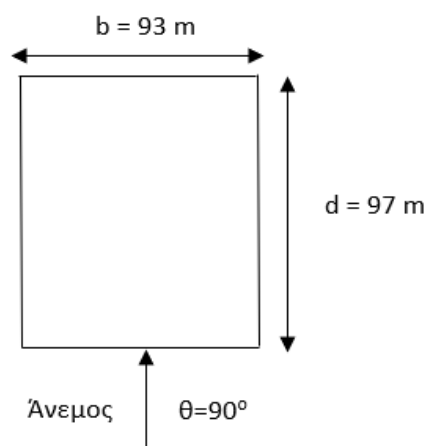
Η συνισταμένη δύναμη κατά την διεύθυνση του ανέμου είναι ίση με:

$$\Sigma F = 3163.86 + 50.22 = 3214.8 \text{ kN} \quad (4-23)$$

Ασκείται σε απόσταση από το έδαφος:

$$z_o = h / 2 = 13.5 \text{ m} \quad (4-24)$$

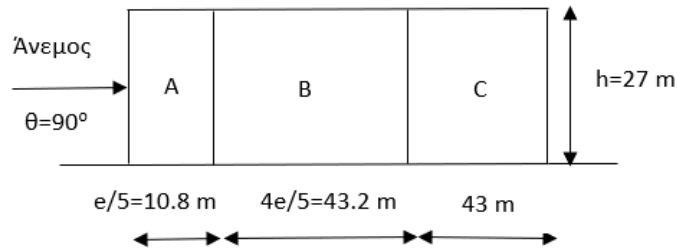
Για διεύθυνση ανέμου $\theta = 90^\circ$



Σχήμα 4-20: Εφαρμογή φορτίου ανέμου για διεύθυνση $\theta=90^\circ$

Κατακόρυφοι στύλοι:

$$e = \min(b ; 2h) = \min(93 ; 54) = 54 \text{ m} < d = 97 \text{ m} \rightarrow 3 \text{ ζώνες A, B, C} \quad (4-25)$$



Σχήμα 4-21: Χωρισμός των επιφανειών των κατακόρυφων στύλων σε ζώνες για διεύθυνση ανέμου $\theta=90^\circ$

$$E_A = 10.8 \cdot 27 = 291.6 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_B = 43.2 \cdot 27 = 1166.4 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_C = 43 \cdot 27 = 1161 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \quad \rightarrow C_{pe} = C_{pe,10}$$

$$E_D = 97 \cdot 27 = 2619 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_E = 97 \cdot 27 = 2619 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

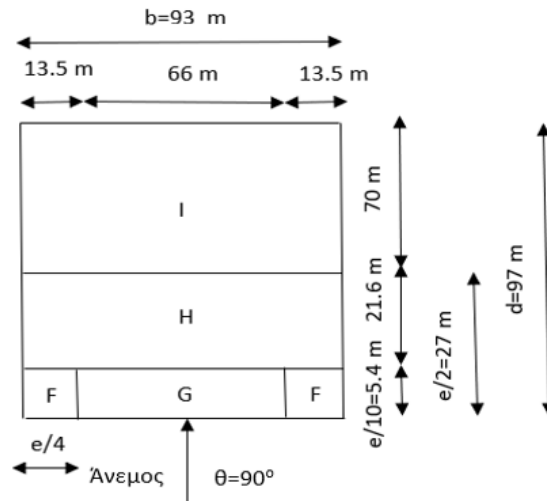
Για $h/d = 0.28$ ισχύει:

Πίνακας 4-19: Οι τιμές του συντελεστή εξωτερικής πίεσης του υπήνεμου τοίχου σε κάθε ζώνη

h/d-ΖΩΝΕΣ	A	B	C	D	E
5	-1.2	-0.8	-0.5	+0.8	-0.7
1	-1.2	-0.8	-0.5	+0.8	-0.5
≤ 0.25	-1.2	-0.8	-0.5	+0.7	-0.3
0.29	-1.2	-0.8	-0.5	+0.70	-0.31

Στέγη: Έχουμε επίπεδη στέγη με αιχμηρά άκρα και με $-5^\circ < \alpha < 5^\circ$ ($\alpha = 0^\circ$)

$e = \min(b; 2h) = \min(93; 54) = 54 \text{ m} < d = 97 \text{ m} \rightarrow$ χωρίζουμε σε ζώνες όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-22.



Σχήμα 4-22: Χωρισμός των επιφανειών της στέγης σε ζώνες για διεύθυνση ανέμου $\theta=90^\circ$

Πίνακας 4-20: Οι τιμές του συντελεστή εξωτερικής πίεσης c_{pe} για κάθε ζώνη

ΖΩΝΗ	F	G	H	I
$C_{pe,10}$	-1.8	-1.2	-0.7	±0.2
$C_{pe,1}$	-2.5	-2.0	-1.2	

$$E_F = 13.5 \cdot 5.4 = 72.9 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_G = 66 \cdot 5.4 = 356.4 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow C_{pe} = C_{pe,10}$$

$$E_H = 21.6 \cdot 93 = 2008.8 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$E_I = 70 \cdot 93 = 6510 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

Πίνακας 4-21: Οι τιμές του τελικού συντελεστή εξωτερικής πίεσης για κάθε ζώνη των στύλων και της στέγης

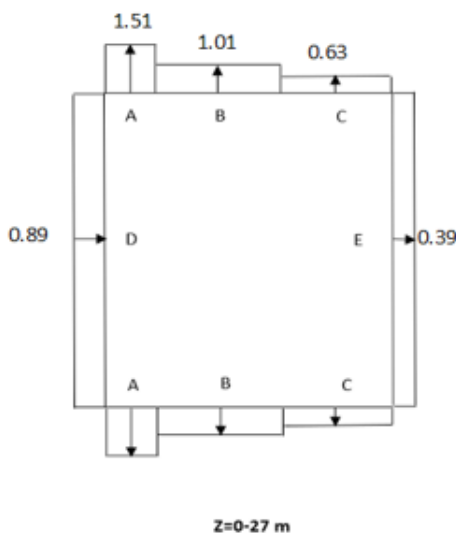
ΖΩΝΗ	A	B	C	D	E	F	G	H	I
C_{pe}	-1.2	-0.8	-0.5	+0.70	-0.31	-1.8	-1.2	-0.7	± 0.2

Εξωτερική πίεση

Η εξωτερική πίεση που ασκείται κάθετα στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου δίνεται από τη σχέση:

Πίνακας 4-22: Η εξωτερική πίεση για κάθε ζώνη των στύλων

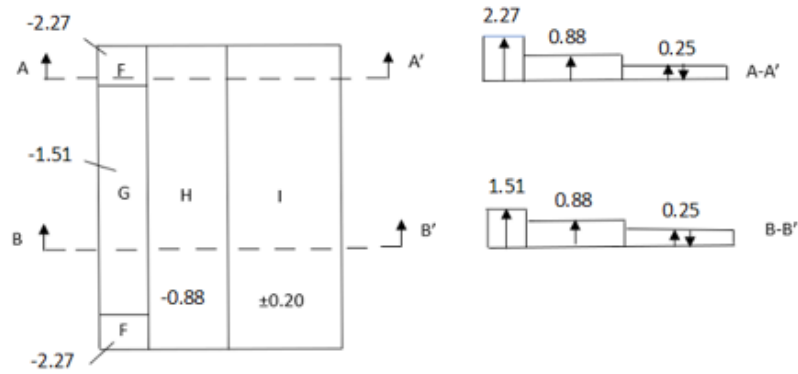
ΖΩΝΗ	A	B	C	D	E
$q_p(z_e)$	1.26				
C_{pe}	-1.2	-0.8	-0.5	+0.70	-0.31
w_e	-1.51	-1.01	-0.63	+0.88	-0.39



Σχήμα 4-23: Οι εξωτερικές πιέσεις που ασκούνται στους κατακόρυφους στύλους

Πίνακας 4-23: Η εξωτερική πίεση για κάθε ζώνη της στέγης

ΖΩΝΗ	F	G	H	I
$q_p(z_e)$	1.26			
C_{pe}	-1.80	-1.20	-0.70	± 0.20
w_e	-2.27	-1.51	-0.88	± 0.25



Σχήμα 4-24: Οι εξωτερικές πιέσεις που ασκούνται στη στέγη

Εσωτερική πίεση

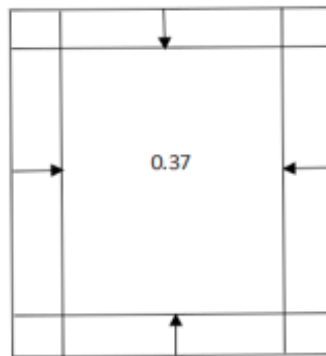
Θεωρώντας: $z_i = z_e$

Συντελεστής εσωτερικής πίεσης:

$$h/d = 27/97 = 0.28, \mu = 0.8 \rightarrow c_{pi} = -0.29 \quad (4.26)$$

Πίνακας 4-24: Η τιμή της εσωτερικής πίεσης στους σύλους και στη στέγη

Τοίχοι / στέγη	
$q_p(z_e)$	1.26
c_{pe}	-0.29
w_i	-0.37



$Z=0-27 \text{ m}$

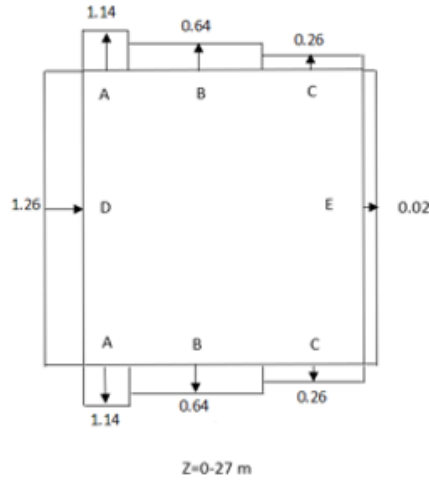
Σχήμα 4-25: Η εσωτερική πίεση που ασκείται σε κάθε επιφάνεια

Τελικές πιέσεις w_{tot}

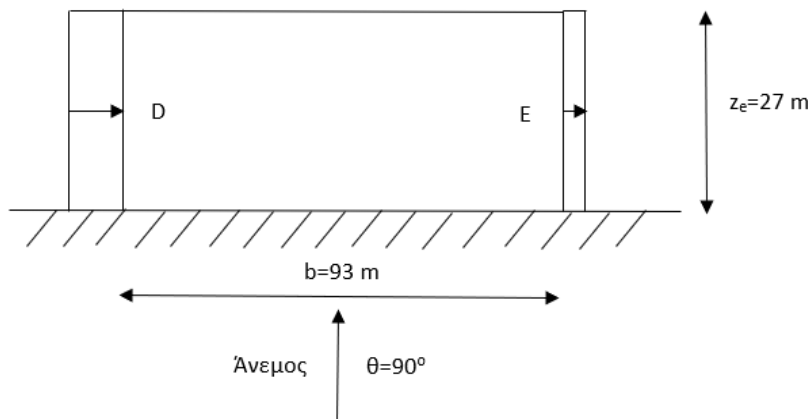
$$\eta = 27 \mu < 100 \mu, \delta = 97 \mu \rightarrow \eta < 4\delta \rightarrow c_{sCd} < 0.85, \text{ λαμβάνω } c_{sCd} = 1 \quad (4.27)$$

Πίνακας 4-25: Η συνολική πίεση που ασκείται σε κάθε ζώνη των κατακόρυφων στύλων

ΖΩΝΗ	A	B	C	D	E
w_e	-1.51	-1.01	-0.63	+0.88	-0.39
w_i	-0.37				
w_{tot}	-1.14	-0.64	-0.26	+1.25	-0.02



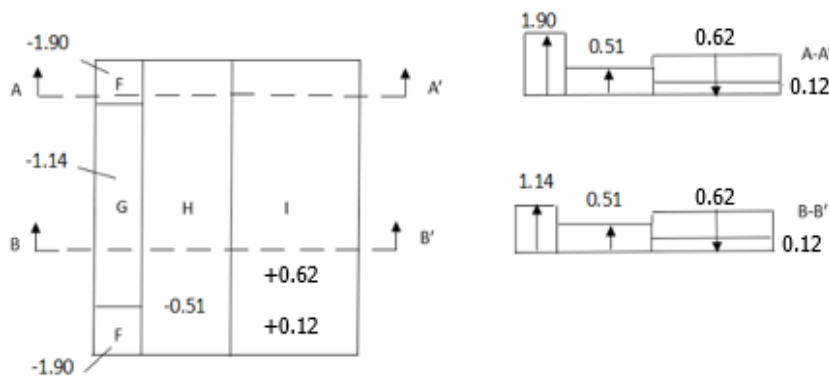
Σχήμα 4-26: Η απεικόνιση της τελικής πίεσης στους κατακόρυφους στύλους



Σχήμα 4-27: Η απεικόνιση της τελικής πίεσης για τις ζώνες D και E των στύλων για διεύθυνση ανέμου $\theta=90^\circ$

Πίνακας 4-26: Η συνολική πίεση που ασκείται σε κάθε ζώνη της στέγης

ΖΩΝΗ	F	G	H	I	
W_e	-2.27	-1.51	-0.88	±0.25	
W_i	-0.37				
W_{tot}	-1.90	-1.14	-0.51	+0.62	+0.12



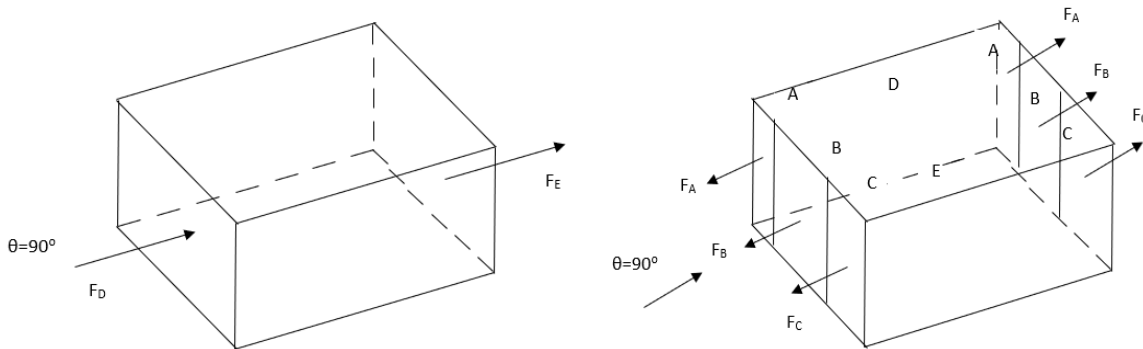
Σχήμα 4 : Η απεικόνιση της τελικής πίεσης στη στέγη

Συνολική Δύναμη

Εφόσον προηγουμένως ορίσαμε τον δυναμικό συντελεστή $c_{sd} = 1.0$, η συνισταμένη δύναμη κάθε επιφάνειας είναι ίση με:

Πίνακας 4-27: Συνολική δύναμη ανέμου για διεύθυνση $\theta=90^\circ$ στις ζώνες των στύλων

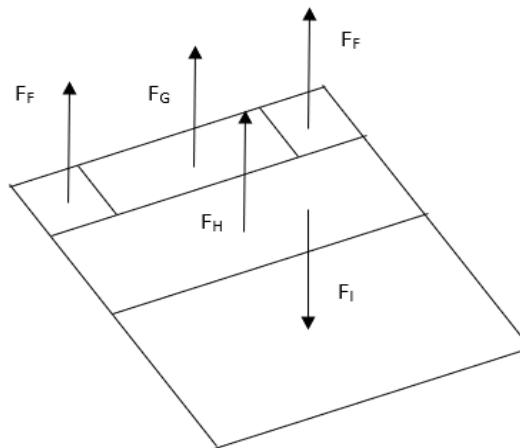
ΖΩΝΗ	A	B	C	D	E
w [kPa]	-1.14	-0.64	-0.26	+1.26	-0.02
A [m ²]	291.6	1166.4	1161	2619	2619
F [kN]	-332.42	-746.50	-301.86	+3273.75	-52.38



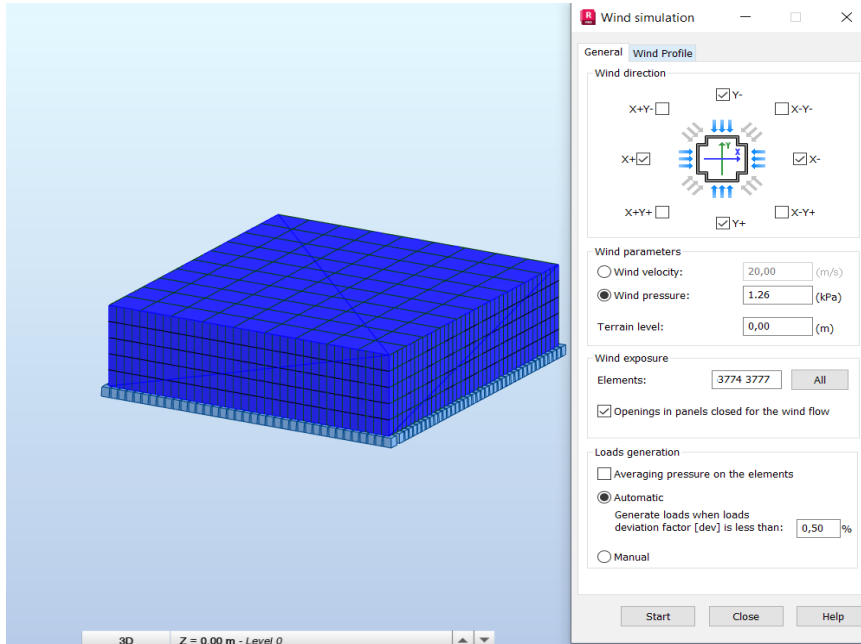
Σχήμα 4-28: Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων ανέμου σε κάθε ζώνη των στύλων για διεύθυνση $\theta=90^\circ$

Πίνακας 4-28: Συνολική δύναμη ανέμου για διεύθυνση $\theta=90^\circ$ στις ζώνες της στέγης

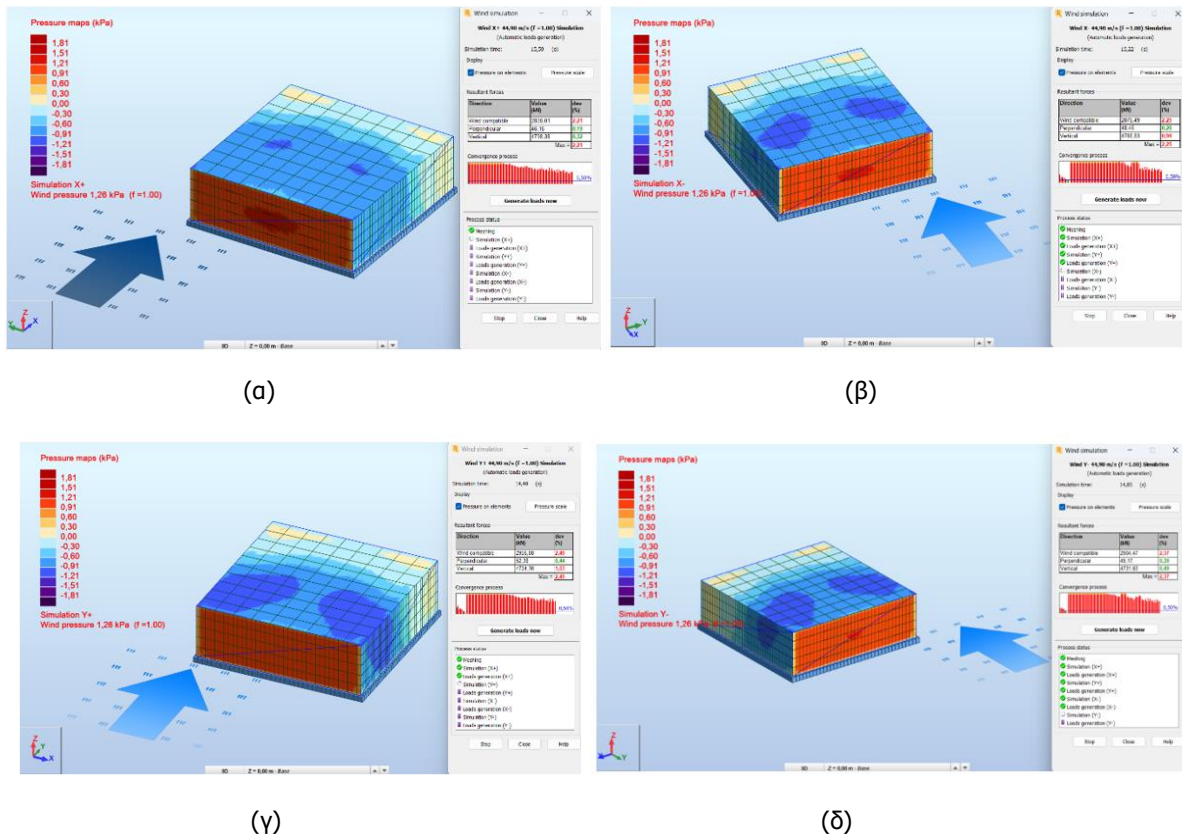
ΖΩΝΗ	F	G	H	I	
w [kPa]	-1.90	-1.14	-0.51	+0.62	+0.12
A [m ²]	72.9	356	2008.8	6510	
F [kN]	-138.51	-406.30	-1024.49	+4036.20	+781.20



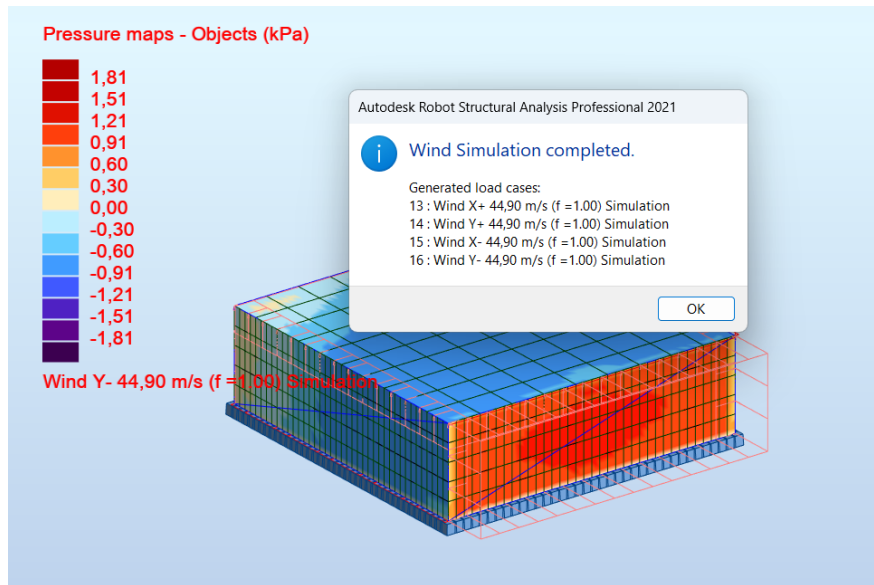
Σχήμα 4-29: Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων ανέμου σε κάθε ζώνη της στέγης για διεύθυνση $\theta=90^\circ$



Σχήμα 4-30: Η εισαγωγή της ανεμοπίεσης σε όλες τις εξωτερικές πλευρές του κτιρίου και για τις δύο διευθύνσεις X και Y

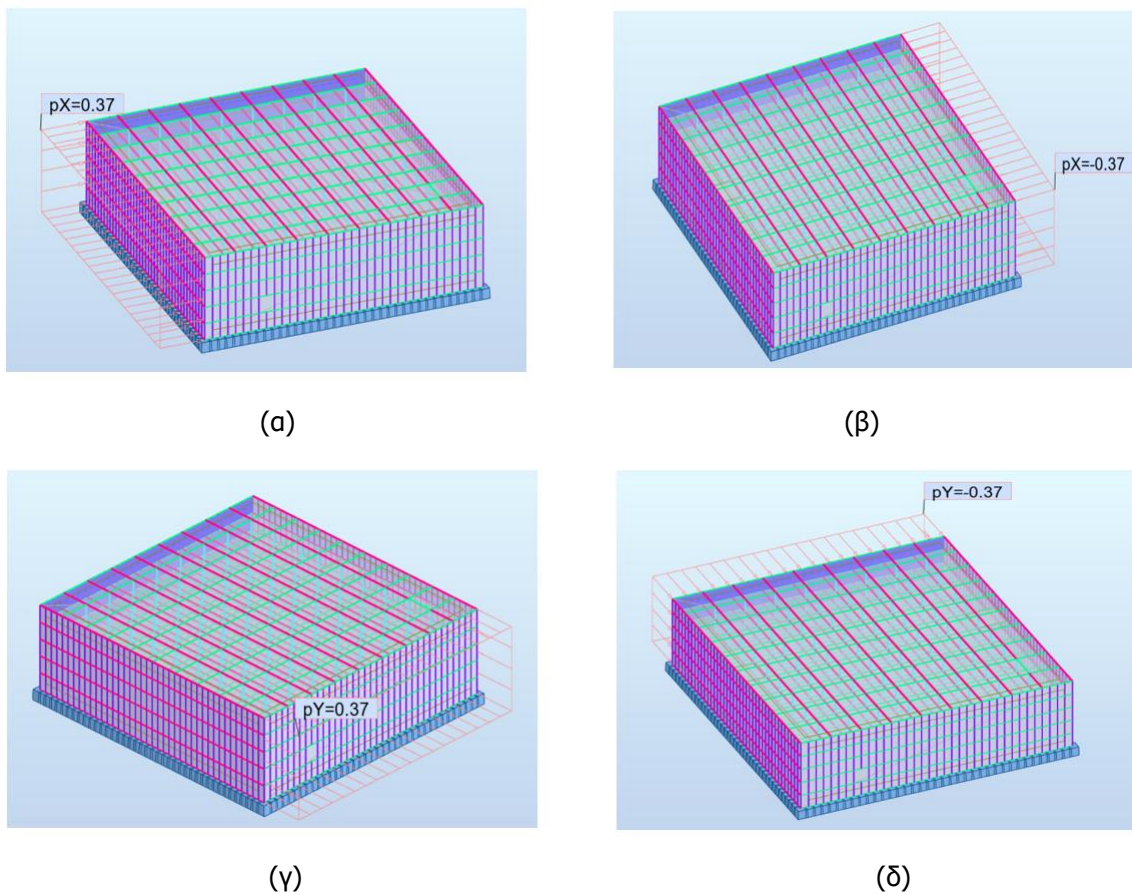


Σχήμα 4-31: Υπολογισμός από το Robot της ανεμοπίεσης κατά (α) +X, (β) -X, (γ) +Y και κατά (δ) -Y



Σχήμα 4-32: Εξαγωγή των αποτελεσμάτων της ανεμοπίεσης για κάθε διεύθυνση

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις εξωτερικές πιέσεις του ανέμου από το πρόγραμμα Robot συμπίπτουν με αυτά από τον υπολογισμό τους στο χέρι. Για τους συνδυασμούς των δράσεων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές τις οποίες εξήγαγε το Robot.



Σχήμα 4-33: Εισαγωγή της εσωτερικής πίεσης του ανέμου σε όλες τις πλευρές του κτιρίου

4.2.4 Σεισμικές Δράσεις

Τα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή λόγω σεισμικών διεγέρσεων κατατάσσονται στα τυχηματικά και προσδιορίζονται όπως ορίζονται στον Ευρωκώδικα EN1998-1:2004-[19]. Χαρακτηριστικό των σεισμικών δράσεων είναι ότι εξετάζονται μεμονωμένα, χωρίς να δημιουργούμε συνδυασμούς με άλλες τυχηματικές δυνάμεις ή φορτία όπως του ανέμου και του χιονιού. Προκειμένου να ασκήσουμε τα σεισμικά φορτία πάνω στο προσομοίωμα της κατασκευής, πρέπει να ορίσουμε ορισμένες παραμέτρους. Για την ενσωμάτωση των σεισμικών φορτίων στο πρόγραμμα Robot χρησιμοποιούμε την ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης και η επαλληλία των μέγιστων ιδιομορφικών αναλύσεων πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου CQC (Complete Quadratic Combination). Οι σεισμικές διεγέρσεις σχεδιασμού δρουν στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους με τη μορφή οριζόντιων συνιστωσών και μίας κατακόρυφης συνιστώσας επιτάχυνσης, οι οποίες δεν εξαρτώνται μεταξύ τους.

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας

Με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8, η Ισπανία χωρίζεται σε τέσσερις (4) επιμέρους ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας:

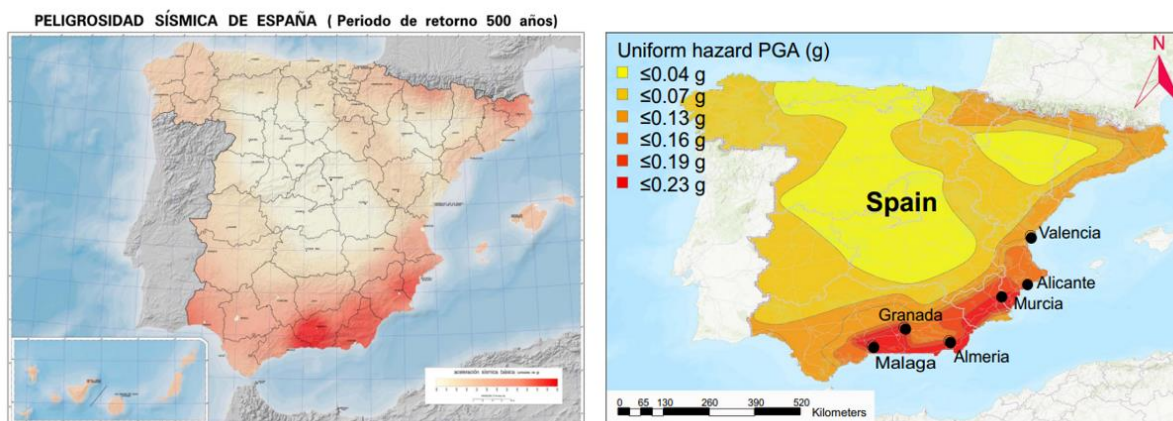
Ζώνη 1: χαμηλά επίπεδα κινδύνου σεισμικής διέγερσης. Σε αυτή τη ζώνη εντάσσονται αρκετές βόρειες περιοχές της Ισπανίας και οι Βαλεαρίδες Νήσοι.

Ζώνη 2: Μέτριος κίνδυνος σεισμού. Ένα μεγάλο ποσοστό της Ιβηρικής Χερσονήσου κατατάσσεται σε αυτή τη ζώνη.

Ζώνη 3: Υψηλός κίνδυνος σεισμικής διέγερσης. Σε αυτή τη ζώνη εντάσσονται τα Πυρηναία και αρκετές περιοχές στα νότια και νοτιοανατολικά της χώρας.

Ζώνη 4: Εξαιρετικά υψηλός κίνδυνος σεισμού. Στη ζώνη αυτή ανήκει η θάλασσα του Αλμποράν και μερικές περιοχές στα νοτιοανατολικά της Ισπανίας.

Συγκεκριμένα, η περιοχή Arteixo, στην οποία εξετάζεται η υπό μελέτη κατασκευή, βρίσκεται στην Coruna της Γαλικίας βορειοδυτικά της Ισπανίας. Η πόλη αυτή εντάσσεται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας 2 και ισχύει: $a_{gR}/g = 0.07$.



Σχήμα 4-34: Η επιτάχυνση του εδάφους ανάλογα με τη σεισμικότητα της κάθε περιοχής της Ισπανίας, [https://www.researchgate.net/publication/265653786 GEOPHYSICAL MAPS OF SPAIN](https://www.researchgate.net/publication/265653786_GEOPHYSICAL_MAPS_OF_SPAIN)

Κατηγορία εδάφους

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, χωρίζουμε το έδαφος σε πέντε (5) κατηγορίες, ανάλογα με την επίδραση που έχει μία σεισμική διέγερση σε κάθε περιοχή. Οι κατηγορίες εδάφους φαίνονται στον Πίνακα 4-29:

Πίνακας 4-29: Οι τιμές των σεισμικών παραμέτρων ανάλογα την κατηγορία εδάφους

Εδαφικός Τύπος	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Η περιοχή Αρτεixo της κατασκευής είναι μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας, για αυτό το λόγο θεωρούμε κατηγορία εδάφους B:

$$S = 1.0, T_B = 0.15 \text{ s}, T_C = 0.5 \text{ s}, T_D = 2.0 \text{ s}$$

Κατηγορία σπουδαιότητας

Πίνακας 4-30: Κατηγορία σπουδαιότητας του κτιρίου

Κατηγορία σπουδαιότητας	Κτίρια
I	Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια, κλπ.
II	Συνήθη κτίρια, που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες.
III	Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.
IV	Κτίρια των οποίων η ακεραιότητα κατά τη διάρκεια σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των πολιτών, π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, κλπ.

Το συγκεκριμένο κτίριο γραφείων ανήκει στην κατηγορία σπουδαιότητας II, σύμφωνα με τον Πίνακα 4-30. Έτσι, λαμβάνεται τιμή $\gamma_I = 1.0$.

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR} = 0.07 \text{ g} \quad (4-28)$$

Συντελεστής συμπεριφοράς

Ο συντελεστής συμπεριφοράς συνεισφέρει στην μείωση των δυνάμεων της γραμμικής ανάλυσης, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μη γραμμική ανάλυση της κατασκευής. Επιλέχθηκε Μέση Κατηγορία Πλαστιμότητας, οπότε ο συντελεστής συμπεριφοράς όπως φαίνεται στον Πίνακα λαμβάνεται ίσος με $q = 4$ και για τις δύο διευθύνσεις του κτιρίου.

Πίνακας 4-31: Κατηγορία Πλαστιμότητας του κτιρίου

ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	Κατηγορία Πλαστιμότητας	
	ΚΠΜ	ΚΠΥ
α) Πλαίσια παραλαβής ροπών	4	$5\alpha_w/\alpha_1$
β) Πλαίσιο με συνδέσμους χωρίς εκκεντροτητα Διαγώνιοι σύνδεσμοι Σύνδεσμοι μορφής V	4	4
	2	2,5
γ) Πλαίσια με έκκεντρος συνδέσμους	4	$5\alpha_w/\alpha_1$

Για τον συντελεστή συμπεριφοράς που επιλέχθηκε και για ΚΠΜ, τα πλαστικά μέλη της κατασκευής πρέπει να είναι κατηγορίας 1 ή 2, σύμφωνα με τον Πίνακα 4-32.

Πίνακας 4-32: Όρια του συντελεστή συμπεριφοράς με βάση την κατηγορία κάθε διατομής

Κατηγορία Πλαστιμότητας	Τιμή αναφοράς του συντελεστή συμπεριφοράς q	Απαιτούμενη κατηγορία διατομής
ΚΠΜ	$1,5 < q \leq 2$	κατηγορία 1, 2 ή 3
	$2 < q \leq 4$	κατηγορία 1 ή 2
ΚΠΥ	$q > 4$	κατηγορία 1

Φάσμα σχεδιασμού

Οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού:

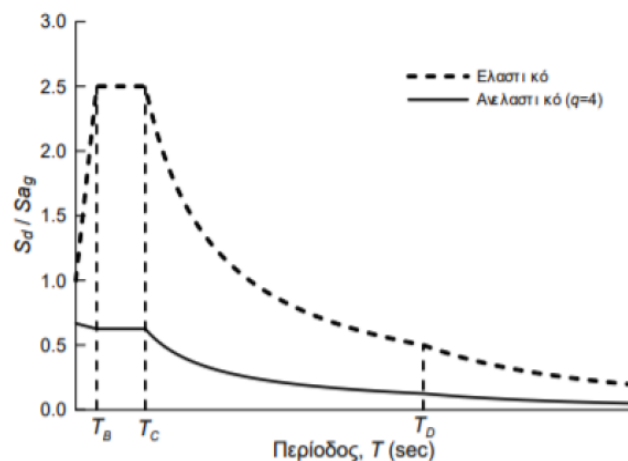
Το φάσμα σχεδιασμού για τις οριζόντιες συνιστώσες των σεισμικών δράσεων δίνεται από τις σχέσεις:

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_C} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (4-29)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (4-30)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \quad (4-31)$$

$$T_D \leq T: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right) \quad (4-32)$$



Σχήμα 4-35: Το διάγραμμα του φάσματος σχεδιασμού

The image shows two software dialog boxes. The left one, titled 'Spanish Code NCSR-02 - Parameters', has a 'Case' dropdown set to 'Seismic - Spanish NCSR-02'. It includes checkboxes for 'Auxiliary case', 'Horizontal' (selected), and 'Vertical'. Parameters include 'Seismic base acceleration' (0,07), 'Coefficient of participation' (K=1), 'Hazard factor' (ρ=1), 'Soil factor' (C=1), and 'Plastic behavior factor' (μ=1). The right window, titled 'Direction', shows 'Normalized' values for X, Y, and Z (all 0,5773). It has a 'Resolution of a force into directions' section with 'Active' checked, 'Quadratic combination' unchecked, and 'Newmark combination' checked with μ=0,3 and λ=0,3. The 'Combination' is set to 'CQC' and τ is 20.

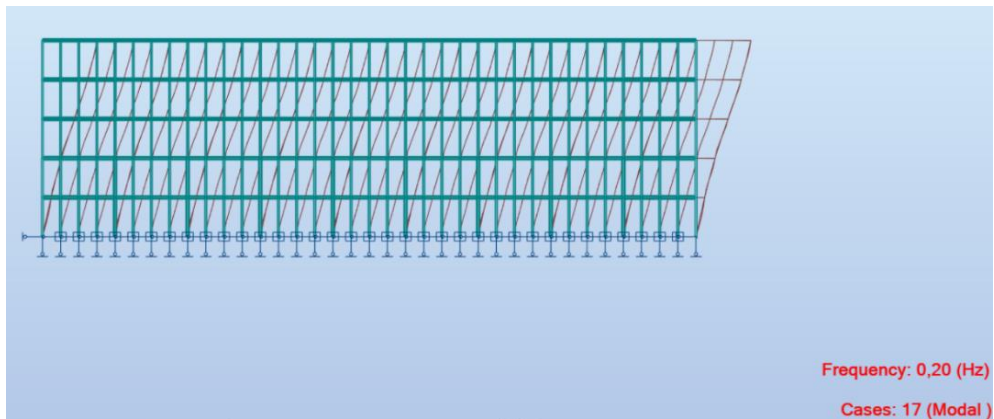
Σχήμα 4-36: Εισαγωγή των παραμέτρων σεισμού σύμφωνα με τους κανονισμούς της Ισπανίας

Ιδιομορφική ανάλυση

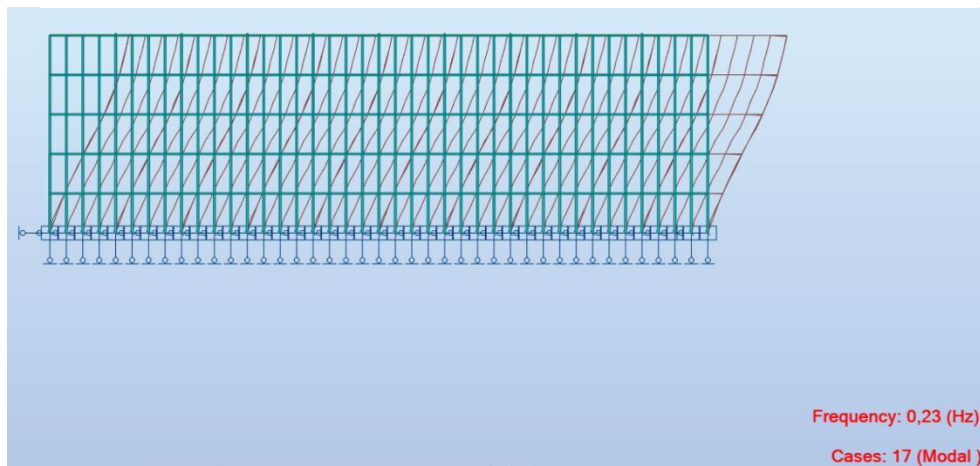
Πίνακας 4-33: Τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης

Case/Mode	Frequency (Hz)	Period (sec)	Rel.mas.UX (%)	Rel.mas.UY (%)	Rel.mas.UZ (%)	Cur.mas.UX (%)	Cur.mas.UY (%)	Cur.mas.UZ (%)
17/ 1	0.20	5.12	77,78	0,00	0,00	77,78	0,00	0,00
17/ 2	0.23	4.30	77,78	81,64	0,00	0,00	81,64	0,00
17/ 3	0.37	2.73	77,78	81,64	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 4	0.59	1.69	92,82	81,64	0,00	15,04	0,00	0,00
17/ 5	0.68	1.47	92,82	93,16	0,00	0,00	11,52	0,00
17/ 6	1.04	0.96	92,82	93,16	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 7	1.16	0.86	92,82	97,32	0,00	0,00	4,16	0,00
17/ 8	1.25	0.80	97,03	97,32	0,00	4,21	0,00	0,00
17/ 9	1.76	0.57	97,03	99,00	0,00	0,00	1,68	0,00
17/ 10	1.80	0.56	97,03	99,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 11	2.16	0.46	98,85	99,00	0,00	1,82	0,00	0,00
17/ 12	2.37	0.42	98,85	100,00	0,00	0,00	1,00	0,00
17/ 13	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 14	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 15	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 16	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 17	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 18	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 19	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 20	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 21	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 22	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 23	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 24	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 25	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 26	2.59	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 27	2.60	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 28	2.60	0.39	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 29	2.62	0.38	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/ 30	2.62	0.38	98,85	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00

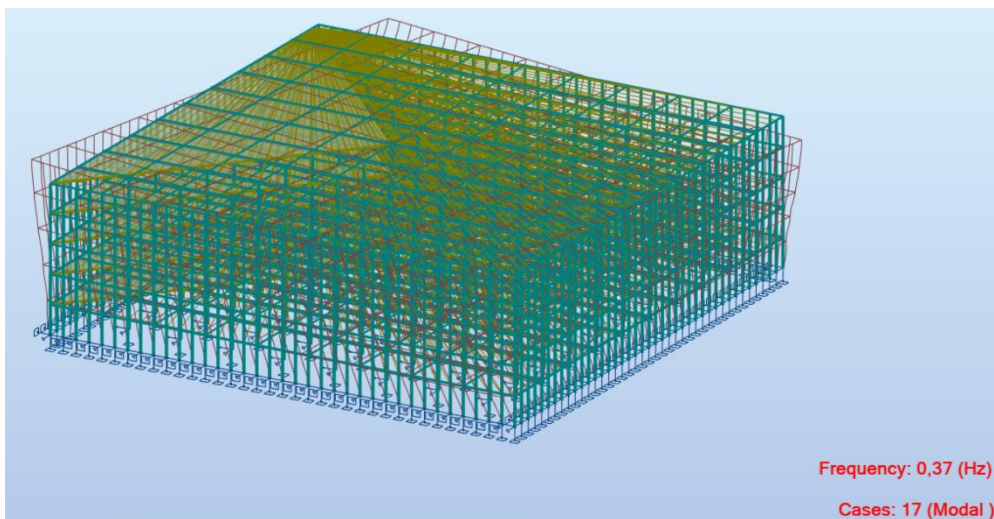
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης για συμμετέχουσα μάζα λόγω των φορτίων $G + 0.3Q$, περισσότερο εύκαμπτη είναι η διεύθυνση Y με δεσπόζουσα ιδιομορφή την 2^η, περίοδο $T_2 = 4.30$ sec και δρώσα ιδιομορφική μάζα $m_2^* = 81.64 \% m_{tot}$. Η διεύθυνση X έχει δεσπόζουσα ιδιομορφή την 4^η με περίοδο $T_4 = 1.69$ sec και δρώσα ιδιομορφική μάζα $m_4^* = 92.82 \% m_{tot}$. Η ιδιοπερίοδος T_2 είναι μεγαλύτερη της $T_D = 2$ sec, οπότε βρίσκεται στον 4^ο κλάδο του ανελαστικού φάσματος σχεδιασμού, ενώ η ιδιοπερίοδος T_1 είναι μικρότερη της T_D και γι' αυτό έχει φτάσει στον 3^ο κλάδο αντίστοιχα. Τέλος, απαιτήθηκαν συνολικά 5 ιδιομορφές και στις δύο διευθύνσεις για να ξεπεραστεί το 90% της συνολικής μάζας.



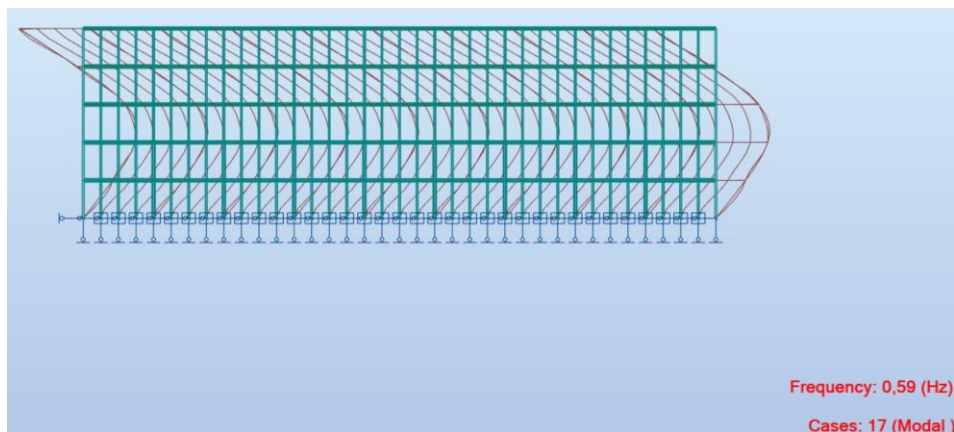
Σχήμα 4-37: Σχηματική απεικόνιση της πρώτης ιδιομορφής του κτιρίου



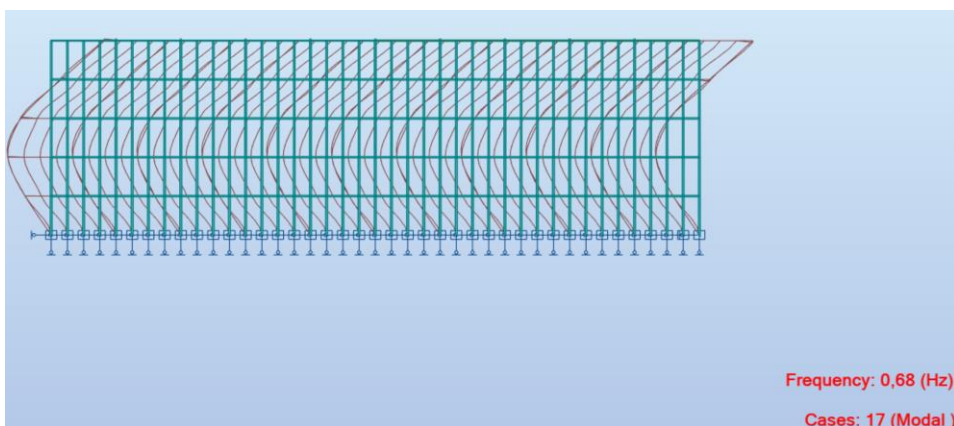
Σχήμα 4 38: Σχηματική απεικόνιση της δεύτερης ιδιομορφής



Σχήμα 4-39: Σχηματική απεικόνιση της τρίτης ιδιομορφής του κτιρίου



Σχήμα 4-40: Σχηματική απεικόνιση της τρίτης ιδιομορφής του κτιρίου



Σχήμα 4-41: Σχηματική απεικόνιση της τέταρτης ιδιομορφής του κτιρίου

4.3 Συνδυασμοί Δράσεων

Στα πλαίσια του Ευρωκώδικα 1, προκειμένου να επιτευχθεί η ασφάλεια, η λειτουργικότητα και τελικά η ανθεκτικότητα στον χρόνο της κατασκευής, ορίζονται οι οριακές καταστάσεις. Μετά το πέρας των οριακών καταστάσεων ο φορέας δεν ανταποκρίνεται πλέον στους κανονισμούς σχεδιασμού του. Μετά τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τιμών των δράσεων, πρέπει να τις πολλαπλασιάσουμε με τους συντελεστές ασφαλείας γ με βάση τις οριακές καταστάσεις σχεδιασμού. Με αυτούς τους συντελεστές λαμβάνονται υπόψη τυχόν αβεβαιότητες των δράσεων. Επιπλέον, τα μεταβλητά φορτία πολλαπλασιάζονται με τους συντελεστές ψ οι οποίοι συνυπολογίζουν την πιθανότητα να συμπέσει η χαρακτηριστική τιμή μιας δράσης με την τιμή μιας άλλης δράσης.

Γενικότερα, το μεταλλικό κτίριο των γραφείων σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να παραλάβει όλα τα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή κατά την ανέγερση και τη χρήση του. Επίσης, κρίνεται εξαιρετικά σημαντικό να αποφεύγεται όσο το δυνατόν περισσότερο η εμφάνιση τυχρηματικών καταστάσεων. Η διάρκεια ζωής του κτιρίου με βάση τον κανονισμό είναι 50 χρόνια.

4.3.1 Οριακή κατάσταση αστοχίας

Η οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS: Ultimate Limit States) αναφέρεται στην κατάρρευση του φορέα ή σε άλλα παραδείγματα πλήρους ή μερικής αστοχίας του. Μέσω αυτής επηρεάζεται η ασφάλεια των ανθρώπων και της ίδιας της κατασκευής. Σε αυτή την περίπτωση κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος ισορροπίας του φορέα, αστοχίας εξαιτίας μεγάλων παραμορφώσεων, καθώς και απώλειας ευστάθειας λόγω κόπωσης.

Διακρίνονται οι παρακάτω συνδυασμοί δράσεων στην οριακή κατάσταση αστοχίας:

Για καταστάσεις διάρκειας ή παροδικές:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j \geq 2} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4-33)$$

Για τυχηματικές καταστάσεις:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{1,1} (\text{ή } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{j \geq 2} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4-34)$$

Για καταστάσεις σεισμού:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{j \geq 2} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4-35)$$

Πίνακας 4-34: Συνδυασμοί φόρτισης για την οριακή κατάσταση αστοχίας (συνεχίζεται στη σελ. 68)

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ	ΜΟΝΙΜΑ	ΩΦΕΛΙΜΑ	ΑΝΕΜΟΣ ΕΞΩΤ.	ΑΝΕΜΟΣ ΕΣΩΤ.	ΧΙΟΝΙ	ΚΥΡΙΑ ΔΡΑΣΗ		
ULS1	1,35	1,5				ΩΦΕΛΙΜΑ		
ULS2	1,35	1,5	0,9	+X	0,9	+X	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS3	1,35	1,5	0,9	+X	0,9	-X	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS4	1,35	1,5	0,9	-X	0,9	+X	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS5	1,35	1,5	0,9	-X	0,9	-X	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS6	1,35	1,5	0,9	+Y	0,9	+Y	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS7	1,35	1,5	0,9	+Y	0,9	-Y	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS8	1,35	1,5	0,9	-Y	0,9	+Y	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS9	1,35	1,5	0,9	-Y	0,9	-Y	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS10	1,35	1,5				0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ	
ULS11	1,35	1,5	0,9	+X	0,9	+X	0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ
ULS12	1,35	1,5	0,9	+X	0,9	-X	0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ
ULS13	1,35	1,5	0,9	-X	0,9	+X	0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ
ULS14	1,35	1,5	0,9	-X	0,9	-X	0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ
ULS15	1,35	1,5	0,9	+Y	0,9	+Y	0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ
ULS16	1,35	1,5	0,9	+Y	0,9	-Y	0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ
ULS17	1,35	1,5	0,9	-Y	0,9	+Y	0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ
ULS18	1,35	1,5	0,9	-Y	0,9	-Y	0,75	ΩΦΕΛΙΜΑ
ULS19	1,35		1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ +X/+X	
ULS20	1,35	1,05	1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ +X/+X	
ULS21	1,35		1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ +X/+X	
ULS22	1,35	1,05	1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ +X/+X	
ULS23	1,35		1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ +X/-X	
ULS24	1,35	1,05	1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ +X/-X	
ULS25	1,35		1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ +X/-X	
ULS26	1,35	1,05	1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ +X/-X	
ULS27	1,35		1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ -X/+X	
ULS28	1,35	1,05	1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ -X/+X	
ULS29	1,35		1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ -X/+X	
ULS30	1,35	1,05	1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ -X/+X	
ULS31	1,35		1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ -X/-X	
ULS32	1,35	1,05	1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ -X/-X	
ULS33	1,35		1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ -X/-X	
ULS34	1,35	1,05	1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ -X/-X	
ULS35	1,35		1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ +Y/+Y	
ULS37	1,35		1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ +Y/+Y	
ULS38	1,35	1,05	1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ +Y/+Y	
ULS39	1,35		1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ +Y/-Y	
ULS40	1,35	1,05	1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ +Y/-Y	

ULS41	1,35		1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ +Y/-Y	
ULS42	1,35	1,05	1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ +Y/-Y	
ULS43	1,35		1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ -Y/+Y	
ULS44	1,35	1,05	1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ -Y/+Y	
ULS45	1,35		1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ -Y/+Y	
ULS46	1,35	1,05	1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ -Y/+Y	
ULS47	1,35		1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ -Y/-Y	
ULS48	1,35	1,05	1,5		1,5		ΑΝΕΜΟΣ -Y/-Y	
ULS49	1,35		1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ -Y/-Y	
ULS50	1,35	1,05	1,5		1,5	0,75	ΑΝΕΜΟΣ -Y/-Y	
ULS51	1,35					1,5	ΧΙΟΝΙ	
ULS52	1,35	1,05				1,5	ΧΙΟΝΙ	
ULS53	1,35		0,9	+X	0,9	+X	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS55	1,35		0,9	-X	0,9	+X	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS56	1,35		0,9	-X	0,9	-X	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS57	1,35		0,9	+Y	0,9	+Y	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS58	1,35		0,9	+Y	0,9	-Y	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS59	1,35		0,9	-Y	0,9	+Y	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS60	1,35		0,9	-Y	0,9	-Y	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS61	1,35	1,05	0,9	+X	0,9	+X	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS62	1,35	1,05	0,9	+X	0,9	-X	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS63	1,35	1,05	0,9	-X	0,9	+X	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS64	1,35	1,05	0,9	-X	0,9	-X	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS65	1,35	1,05	0,9	+Y	0,9	+Y	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS66	1,35	1,05	0,9	+Y	0,9	-Y	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS67	1,35	1,05	0,9	-Y	0,9	+Y	1,5	ΧΙΟΝΙ
ULS68	1,35	1,05	0,9	-Y	0,9	-Y	1,5	ΧΙΟΝΙ

Πίνακας 4-35: Οι τιμές του συντελεστή ασφάλειας

	Οριακή κατάσταση αστοχίας		Οριακές κατάσταση λειτουργικότητας	
	Δυσμενής Επίδραση	Ευμενής Επίδραση	Δυσμενής Επίδραση	Ευμενής Επίδραση
γ_s	1,35	1,0	1,0	1,0
γ_p	1,5	0	1,0	0

Πίνακας 4-36: Οι τιμές των συντελεστών συνδυασμού για τις μεταβλητές δράσεις

Δράσεις	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Επιβαλλόμενα φορτία σε κτήρια, κατηγορία (βλέπε EN 1991-1-1)			
Κατηγορία A: κατοικίες, συνήθη κτήρια κατοικιών	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία B: χώροι γραφείων			
Κατηγορία C: χώροι συνάθροισης	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία D: χώροι καταστημάτων	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία E: χώροι αποθήκευσης	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία F: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων βάρος οχημάτων $\leq 30\text{kN}$	1,0	0,9	0,8
Κατηγορία G: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων $30\text{kN} < \text{βάρος οχημάτων} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία H: στέγες	0,7	0,5	0,3
	0	0	0
Φορτία χιονιού επάνω σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-3)*			
Φιλανδία, Ισλανδία, Νορβηγία, Σουηδία	0,70	0,50	0,20
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H > 1000\text{ m}$	0,70	0,50	0,20
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H \leq 1000\text{ m}$	0,50	0,20	0
Φορτία ανέμου σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Θερμοκρασία (μη-πυρκαϊάς) σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

Στο πρόγραμμα Robot οι συνδυασμοί δράσεων για τις οριακές καταστάσεις σχεδιασμού μπορούν να εισαχθούν αυτόματα ακολουθώντας τις εντολές: *Loads Automatic Combinations*. Ωστόσο, είναι πιθανό το πρόγραμμα να μην διαβάξει σωστά τα φορτία και να τους τοποθετεί λανθασμένους συντελεστές κατά τον σχηματισμό των συνδυασμών. Προκειμένου να αποφύγουμε, λοιπόν, τυχόν λάθη προτιμούμε να σχηματίσουμε τους συνδυασμούς χειροκίνητα με τα εξής βήματα: *Loads Manual Combinations*. Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι συνδυασμοί για την οριακή κατάσταση αστοχίας του φορέα.

4.3.2 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS: Serviceability Limit States) αφορά συγκεκριμένες συνθήκες μετά το πέρας των οποίων ο φορέας ή ορισμένα μέλη αυτού δεν ικανοποιούν τις λειτουργικές απαιτήσεις. Σε αυτό το στάδιο πρέπει να εξεταστούν οι προκαλούμενες παραμορφώσεις οι οποίες επηρεάζουν την άνεση των ατόμων και τη λειτουργία του κτιρίου, οι ταλαντώσεις μεγάλου εύρους, οι δονήσεις και οι ρηγματώσεις που επηρεάζουν την αντοχή της κατασκευής.

Διακρίνονται οι παρακάτω συνδυασμοί δράσεων στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας:

Χαρακτηριστικός συνδυασμός:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "Q_{k,1}" + \sum_{j \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4-36)$$

Συχνός συνδυασμός:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4-37)$$

Οιονεί μόνιμος συνδυασμός:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + \sum_{i \leq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4-38)$$

Πίνακας 4-37: Συνδυασμοί φόρτισης για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (συνεχίζεται στη σελ. 70)

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ	ΜΟΝΙΜΑ	ΩΦΕΛΙΜΑ	ΑΝΕΜΟΣ		ΧΙΟΝΙ	ΚΥΡΙΑ ΔΡΑΣΗ
			ΕΞΩΤ.	ΕΣΩΤ.		
SLS1	1	1				ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS2	1	1	0,6	+X	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS3	1	1	0,6	+X	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS4	1	1	0,6	-X	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS5	1	1	0,6	+X	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS6	1	1	0,6	+Y	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS7	1	1	0,6	+Y	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS8	1	1	0,6	-Y	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS9	1	1	0,6	-Y	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS10	1	1			0,5	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS11	1	1	0,6	+X	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS12	1	1	0,6	+X	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS13	1	1	0,6	-X	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS14	1	1	0,6	-X	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS15	1	1	0,6	+Y	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS16	1	1	0,6	+Y	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS17	1	1	0,6	-Y	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS18	1	1	0,6	-Y	0,6	ΩΦΕΛΙΜΑ
SLS19	1		1	1	0,5	ΑΝΕΜΟΣ +X/+X
SLS20	1	0,7	1	1		ΑΝΕΜΟΣ +X/+X
SLS21	1		1	1	0,5	ΑΝΕΜΟΣ +X/+X
SLS22	1	0,7	1	1	0,5	ΑΝΕΜΟΣ +X/+X
SLS23	1		1	1		ΑΝΕΜΟΣ +X/-X
SLS24	1	0,7	1	1		ΑΝΕΜΟΣ +X/-X
SLS26	1	0,7	1	1	0,5	ΑΝΕΜΟΣ +X/-X

SLS27	1		1		1			ANEMΟΣ -X/+X
SLS28	1	0,7	1		1			ANEMΟΣ -X/+X
SLS29	1		1		1	0,5		ANEMΟΣ -X/+X
SLS30	1	0,7	1		1	0,5		ANEMΟΣ -X/+X
SLS31	1		1		1			ANEMΟΣ -X/-X
SLS32	1	0,7	1		1			ANEMΟΣ -X/-X
SLS33	1		1		1	0,5		ANEMΟΣ -X/-X
SLS34	1	0,7	1		1	0,5		ANEMΟΣ -X/-X
SLS35	1		1		1			ANEMΟΣ +Y/+Y
SLS36	1	0,7	1		1			ANEMΟΣ +Y/+Y
SLS37	1		1		1	0,5		ANEMΟΣ +Y/+Y
SLS38	1	0,7	1		1	0,5		ANEMΟΣ +Y/+Y
SLS39	1		1		1			ANEMΟΣ +Y/-Y
SLS40	1	0,7	1		1			ANEMΟΣ +Y/-Y
SLS41	1		1		1	0,5		ANEMΟΣ +Y/-Y
SLS42	1	0,7	1		1	0,5		ANEMΟΣ +Y/-Y
SLS43	1		1		1			ANEMΟΣ -Y/+Y
SLS44	1	0,7	1		1			ANEMΟΣ -Y/+Y
SLS45	1		1		1	0,5		ANEMΟΣ -Y/+Y
SLS46	1	0,7	1		1	0,5		ANEMΟΣ -Y/+Y
SLS47	1		1		1			ANEMΟΣ -Y/-Y
SLS48	1	0,7	1		1			ANEMΟΣ -Y/-Y
SLS49	1		1		1	0,5		ANEMΟΣ -Y/-Y
SLS50	1	0,7	1		1	0,5		ANEMΟΣ -Y/-Y
SLS51	1					1		ΧΙΟΝΙ
SLS52	1	0,7				1		ΧΙΟΝΙ
SLS53	1		0,5	+X	0,5	+X	1	ΧΙΟΝΙ
SLS54	1		0,5	+X	0,5	-X	1	ΧΙΟΝΙ
SLS55	1		0,5	-X	0,5	+X	1	ΧΙΟΝΙ
SLS56	1		0,5	-X	0,5	-X	1	ΧΙΟΝΙ
SLS57	1		0,5	+Y	0,5	+Y	1	ΧΙΟΝΙ
SLS58	1		0,5	+Y	0,5	-Y	1	ΧΙΟΝΙ
SLS59	1		0,5	-Y	0,5	+Y	1	ΧΙΟΝΙ
SLS60	1		0,5	-Y	0,5	-Y	1	ΧΙΟΝΙ
SLS61	1	0,7	0,5	+X	0,5	+X	1	ΧΙΟΝΙ
SLS62	1	0,7	0,5	+X	0,5	-X	1	ΧΙΟΝΙ
SLS63	1	0,7	0,5	-X	0,5	+X	1	ΧΙΟΝΙ
SLS64	1	0,7	0,5	-X	0,5	-X	1	ΧΙΟΝΙ
SLS65	1	0,7	0,5	+Y	0,5	+Y	1	ΧΙΟΝΙ
SLS66	1	0,7	0,5	+Y	0,5	-Y	1	ΧΙΟΝΙ
SLS67	1	0,7	0,5	-Y	0,5	+Y	1	ΧΙΟΝΙ
SLS68	1	0,7	0,5	-Y	0,5	-Y	1	ΧΙΟΝΙ

5 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

5.1 Προσδιορισμός Ανάλυσης

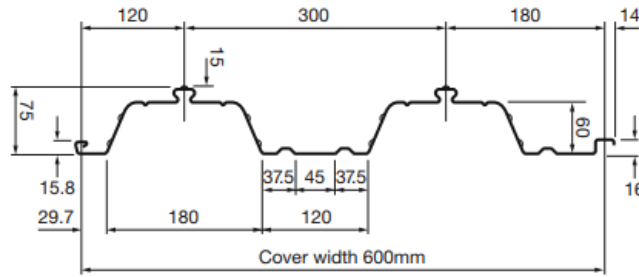
Η διαστασιολόγηση του φορέα πραγματοποιήθηκε μέσω γραμμικής ελαστικής ανάλυσης. Τα υποστυλώματα έχουν διαταχθεί με τον ασθενή τους άξονα προς τα έξω, ώστε να λειτουργούν ως πλαίσια με τις δοκούς, καθώς και για διευκόλυνση της σύνδεσής τους. Εκτός από τον έλεγχο αντοχής των μελών στους διάφορους συνδυασμούς φόρτισης αστοχίας και λειτουργικότητας, έγινε έλεγχος σε καμπτικό και πλευρικό λυγισμό.

5.2 Διαστασιολόγηση σύμμικτης πλάκας

Η διαστασιολόγηση της σύμμικτης πλάκας συνολικού ύψους 120 mm, η οποία στηρίζεται πάνω στις δευτερεύουσες δοκούς, γίνεται στο πρόγραμμα *ComFlorME*. Συγκεκριμένα, επιλέγεται χαλυβδόφυλλο ComFlor 60 της εταιρείας TATASteel ύψους 60mm (συνολικό ύψος 75 mm) και πάχους 0.9 mm, με ποιότητα χάλυβα S350 ($f_{yb} = 350$ MPa). Η πλάκα είναι συνεχής πολλών ανοιγμάτων: 1.25 m. Χρησιμοποιείται σκυρόδεμα ποιότητας C30/37.



Σχήμα 5-1: Απεικόνιση του επιλεγόμενου χαλυβδόφυλλου ComFlor 60, [37]



Σχήμα 5-2: Γεωμετρική απεικόνιση του επιλεγόμενου χαλυνδόφυλλου, [37]

Το ίδιο βάρος του χαλυβδόφυλλου για πάχος 0.90 mm είναι σύμφωνα με τον Πίνακα 5-1 ίσο με: $g_1 = 0.103 \text{ kN/m}^2$. Επίσης, στα φορτία προστίθεται το φορτίο για της επικαλύψεις: $g_2 = 1.2 \text{ kN/m}^2$, καθώς και το ωφέλιμο φορτίο: $q = 3 \text{ kN/m}^2$.

Ελάχιστο συνολικό ύψος: $\min h_{ολ} = 90 \text{ mm}$.

Ελάχιστο ύψος πάνω από το χαλυβδόφυλλο: $\min h_c = 50 \text{ mm}$.

Πίνακας 5-1: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χαλυβδόφυλλου για τα διάφορα πάχη

Section Properties (per metre width)							
Nominal Thickness (mm)	Design Thickness (mm)	Profile Weight (kN/m ²)	Area of Steel (mm ² /m)	Height to Neutral Axis (mm)	Moment of Inertia (cm ⁴ /m)	Ultimate Moment Capacity (kNm/m)	
						Sagging	Hogging
0.75	0.70		(0.75 ComFlor 60 is in development at time of publication)				
0.90	0.86	0.103	1276	29.6	92.77	9.30	7.50
1.00*	0.96	0.114	1424	30.5	106.15	11.27	9.36
1.10*	1.06	0.125	1572	31.2	119.53	13.24	11.21
1.20	1.16	0.137	1721	31.7	132.91	15.21	13.07

Τα αποτελέσματα από την επίλυση της πλάκας μέσω του προγράμματος ComFlorME βρίσκονται στο Παραρτημα Α: Αποτελεσματα Συμμεκτης Πλακασ-Δοκου.

Υπολογισμός φορτίων:

Φάση κατασκευής: Ίδιο βάρος χαλυβδόφυλλου, νωπού σκυροδέματος, φορτία διάστρωσης

Εμβαδόν-Ίδιο βάρος νωπού σκυροδέματος

$$b = 180 + 120 = 300 \text{ mm} \quad (5-1)$$

$$A_c = (120 + 300) \cdot \frac{60}{2} + (h - h_p) \cdot b = 12600 + (120 - 60) \cdot 300 = 30600 \text{ mm}^2/\text{φάτνωμα} \quad (5-2)$$

$$h_{c,eq} = \frac{A_c}{b} = \frac{30600 \text{ mm}^2}{300 \text{ mm}} = 102 \text{ mm} \rightarrow \text{ισοδύναμο πάχος σκυροδέματος} \quad (5-3)$$

$$g_c' = 2.05 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{ίδιο βάρος νωπού σκυροδέματος} \quad (5-4)$$

Φορτία διάστρωσης:

$$\begin{cases} q_1 = 0.75 \text{ kN/m}^2, \text{ ομοιόμορφα κατανεμημένο} \\ q_2 = 0.75 \text{ kN/m}^2, \text{ ομοιόμορφα κατανεμημένο σε επιφάνεια } 3 \times 3 \text{ m} \end{cases} \quad (5-5)$$

Πίνακας 5-2: Το ίδιο βάρος της σύμμικτης πλάκας ανάλογα με το πλάτος της μαζί με το χαλυβδόφυλλο

ComFlor® 60 composite slab – volume and weight

Slab depth (mm)	Concrete volume (m ³ /m ²)	Weight of concrete (kN/m ²)			
		Normal weight concrete		Lightweight concrete	
		Wet	Dry	Wet	Dry
120	0.087	2.05	2.00	1.62	1.53
130	0.097	2.28	2.23	1.81	1.71
140	0.107	2.52	2.46	1.99	1.89
150	0.117	2.75	2.69	2.18	2.06
160	0.127	2.99	2.93	2.36	2.24
170	0.137	3.22	3.16	2.55	2.42
180	0.147	3.46	3.39	2.74	2.59
190	0.157	3.69	3.62	2.92	2.77

Έλεγχος χαλυβδόφυλλου κατά τη φάση κατασκευής

$$G = g_p = 0.103 \text{ kN/m}^2 \quad (5-6)$$

$$q = 2.05 + 0.75 + 0.75 = 3.075 \text{ kN/m}^2 \quad (5-7)$$

$$\text{ΟΚΑ: } q_{Ed} = 1.35 \cdot 0.103 + 1.5 \cdot 3.075 = 4.75 \text{ kN/m}^2 \quad (5-8)$$

$$\text{ΟΚΛ: } q = 1.0 \cdot 0.103 + 1.0 \cdot 3.075 = 3.18 \text{ kN/m}^2 \quad (5-9)$$

$$\delta = \frac{p \cdot L^4}{384EI} = 1.04 \cdot 10^{-4} < \frac{L_e}{250} = 0.0035 \text{ m, βέλος} \quad (5-10)$$

Η ροπή αδράνειας βρίσκεται σύμφωνα με τον Πίνακα 5-1 από τον κατασκευαστή.

Έλεγχος βελών για αύξηση πάχους πλάκας

$$p = g_p + g_c = 0.103 + 2.05 = 2.15 \text{ kN/m}^2 \quad (5-11)$$

$$\delta = \frac{p \cdot L^4}{384EI} = 7.02 \cdot 10^{-5} < \frac{L_e}{250} = 0.0035 \text{ m και } < 20 \text{ mm} \quad (5-12)$$

Άρα δεν χρειάζεται να θεωρήσουμε αύξηση πάχους λόγω βέλους.

Φάση λειτουργίας: Έλεγχος σύμμικτης διατομής

Μόνιμα φορτία: ίδιο βάρος χαλυβδόφυλλου, ξηρού σκυροδέματος, επικαλύψεις

$$g_{tot} = g_p + g_c = 0.103 + 2.05 \cdot \frac{23.5}{24} + 1.2 = 3.31 \text{ kN/m}^2 \quad (5-13)$$

$$q = 2.5 \text{ kN/m}^2 \quad (5-14)$$

$$\text{ΟΚΑ: } q_d = 1.35 \cdot g + 1.5 \cdot q = 8.82 \text{ kN/m}^2 \quad (5-15)$$

$$\text{ΟΚΛ: } q_{\text{ΟΚΛ}} = 1.0 \cdot g + 1.0 \cdot q = 5.81 \text{ kN/m}^2 \quad (5-16)$$

Υπολογισμός ροπής αντοχής

Μέγιστη εφελκυστική δύναμη χαλυβδόφυλλου ανά μέτρο ($A_p = 12.76 \text{ cm}^2/\text{m}$):

$$N_p = A_p \cdot f_{ypd} = 12.76 \cdot 350 \cdot 10^3 = 446.60 \text{ kN/m} \quad (5-17)$$

Θλιπτική δύναμη σκυροδέματος (λαμβάνεται υπόψη μόνο το σκυρόδεμα πάνω από το χαλυβδόφυλλο):

$$N_{cp1} = A_c \cdot 0.85f_{cd} = 0.018 \cdot 0.85 \cdot 30000 / 1.5 = 306 \text{ kN/m} \quad (5-18)$$

$N_p < N_{cp1} \rightarrow$ άρα ο ουδέτερος άξονας είναι εντός του χαλυβδόφυλλου για θετικές ροπές

Θετικές πλαστικές ροπές

Θέση ουδέτερου άξονα:

$$N_{cf} = N_p \rightarrow x_{pl} = \frac{A_p \cdot f_{ypd}}{b \cdot 0.85f_{cd}} = \frac{446.60}{1.2 \cdot 0.85 \cdot 30000 / 1.5} = 0.022 \text{ m} = 2.2 \text{ cm} < h_c = 6 \text{ cm} \quad (5-19)$$

$$z_s = \frac{h \cdot (B+2b)}{3 \cdot (B+b)} = \frac{60 \cdot (180+2 \cdot 120)}{3 \cdot (180+120)} = 28 \text{ mm} \quad (5-20)$$

$$d = h - z_s = 120 - 28 = 92 \text{ mm} \quad (5-21)$$

$$M_{pl, Rd^+} = N_p \cdot \left(d_p - \frac{x_{pl}}{2}\right) = 306 \cdot \left(92 - \frac{22}{2}\right) \cdot 10^{-3} = 24.79 \text{ kNm/m} \quad (5-22)$$

Αρνητικές πλαστικές ροπές

Η συμμετοχή του χαλυβδόφυλλου αγνοείται και γίνεται η παραδοχή θεώρησης σταθερού πάχους της αυλάκωσης σκυροδέματος.

$$b_p = \frac{180+120}{2} = 150 \text{ mm}, \gamma_{KB} = z_s = 28 \text{ mm} \quad (5-23)$$

Για κτιριακά έργα χρησιμοποιούμε την ανάλυση ανεξάρτητων αμφιέριστων πλακών:

$$\text{ΟΚΑ: } M_{Ed} = q_d \cdot \frac{l^2}{8} = 8.82 \cdot \frac{1.25^2}{8} = 1.72 \text{ kNm/m} < M_{plRd^+} \quad (5-24)$$

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 f_{cd}} = 0.05 \rightarrow \omega = 0.051 \rightarrow A_{sd} = \omega \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 3.81 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (5-25)$$

Τοποθετείται άνω οπλισμός Φ10/150 με $A_s = 5.24 \text{ cm}^2/\text{m}$ σε απόσταση 5 cm από την άνω ίνα και κάτω οπλισμός Φ8/150 σε απόσταση 10 cm από την άνω ίνα.

Μέγιστη εφελκυστική δύναμη οπλισμού ανά φάτνωμα:

$$N_s = A_s \cdot f_{sd} = 5.24 \text{ cm}^2/\text{m} \cdot 0.3 \text{ m} \cdot \frac{50 \text{ kN/cm}^2}{1.15} = 68.35 \text{ kN} \quad (5-26)$$

Μέγιστη θλιπτική δύναμη σκυροδέματος ανά φάτνωμα:

$$N_c = A_c \cdot 0.85f_{cd} = 30600 \cdot 10^{-6} \cdot 0.85 \cdot \frac{30000}{1.5} = 520.2 \text{ kN} > N_s \quad (5-27)$$

Θέση ουδέτερου άξονα:

$$N_c = N_s \rightarrow x_{pl} = \frac{A_s \cdot f_{sd}}{b \cdot 0.85 f_{cd}} = \frac{68.35}{0.15 \cdot 0.85 \cdot 30000 / 1.5} = 0.027 \text{ m} < h_p = 0.060 \text{ m} \quad (5-28)$$

Πλαστική ροπή αντοχής για φάτνωμα:

$$M_{pl, Rd} = -N_s \cdot \frac{-68.35 \cdot (0.12 - 0.03 - \frac{0.02}{2})}{0.3} = 18.23 \text{ kNm/m} \quad (5-29)$$

Πάνω από τις στηρίξεις και για μήκος 1.2 m εκατέρωθεν τοποθετείται επιπλέον οπλισμός ρηγμάτωσης:

$$A_s = 0.002 A_{c, \text{συμ}} = 0.002 \cdot 100 \cdot (12 - 6) = 0.4 \text{ cm}^2 \quad (5-30)$$

Έλεγχος τεμνουσών ΟΚΑ

$$V_{Ed} = q_d \cdot \frac{l}{2} = 8.82 \cdot \frac{1.25}{2} = 5.51 \text{ kN/m} \quad (5-31)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{92}} = 2.47 > 2 \rightarrow k = 2 \quad (5-32)$$

$$\rho_l = \frac{A_p \cdot b}{b_o \cdot d_p} = \frac{12.76 \cdot 0.3}{15 \cdot 9.2} = 0.028 > 0.02 \rightarrow \rho_l = 0.02 \quad (5-33)$$

$$C_{Rk,c} = 0.18 \quad (5-34)$$

$$\tau_{Rd} = C_{Rk,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} = 0.18 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0.02 \cdot 30)^{1/3} = 1.41 \text{ MPa} \quad (5-35)$$

$$v_{min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot \sqrt{f_{ck}} = 0.035 \cdot 2^{3/2} \cdot \sqrt{30} = 0.54 \text{ MPa} < \tau_{Rd} \quad (5-36)$$

Αντοχή πλάκας έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rdc} = b_o \cdot d_p \cdot \frac{\tau_{Rd}}{b} = 150 \cdot 92 \cdot \frac{1.41}{300} = 64.86 \text{ kN/m} > V_{Ed} = 5.51 \text{ kN/m} \quad (5-37)$$

Έλεγχος σε ΟΚΙ

Γίνεται απλοποιητικά η παραδοχή αμφιέριστης ισοδύναμης πλάκας με συμπαγές σταθερό ύψος ίσο με:

$$h_{eq} = 0.1 \text{ m} \quad (5-38)$$

Ροπή αδράνειας ισοδύναμης πλάκας για λωρίδα 1 m:

$$I = 1.0 \cdot \frac{h_{eq}^3}{12} = 8333.33 \text{ cm}^4 \quad (5-39)$$

Βέλος λόγω ωφέλιμων φορτίων:

$$\delta_1 = \frac{5qL^4}{384EI} = \frac{5 \cdot 2.5 \cdot 1.25^4}{384 \cdot 33 \cdot 10^6 \cdot 8333.33 \cdot 10^{-8}} = 0.029 \text{ mm} < \frac{L}{350} = 3.57 \text{ mm} \quad (5-40)$$

Βέλος συνολικών φορτίων:

$$\delta_2 = \frac{5qL^4}{384EI} = \frac{5 \cdot 5.81 \cdot 1.25^4}{384 \cdot 33 \cdot 10^6 \cdot 8333.33 \cdot 10^{-8}} = 0.067 \text{ mm} < \frac{L}{350} = 5 \text{ mm} \quad (5-41)$$

Ρηγμάτωση

Τοποθετείται κατασκευαστικός οπλισμός.

$$\text{Στηρίξεις: } \rho = 0.2\% \rightarrow A_s = 0.2 (h - h_p) = 1.2 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (5-42)$$

$$\text{Ανοίγματα: } \rho = 0.1\% \rightarrow A_s = 0.1 (h - h_p) = 0.6 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (5-43)$$

Έχει τοποθετηθεί οπλισμός Φ8/130 με $A_s = 3.87 \text{ cm}^2/\text{m}$, άρα ο οπλισμός επαρκεί.

Ταλαντώσεις

Φορτίο συχνού συνδυασμού:

$$q = 1.0 \cdot g + 0.3 \cdot q = 1.0 \cdot 3.31 + 0.3 \cdot 2.5 = 4.06 \text{ kN/m}^2 \quad (5-44)$$

$$\mu = \frac{q}{b} = \frac{4.06 \text{ kN/m}^2}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2} \cdot 1 \text{ m}} = 0.41 \text{ kN} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^2 \quad (5-45)$$

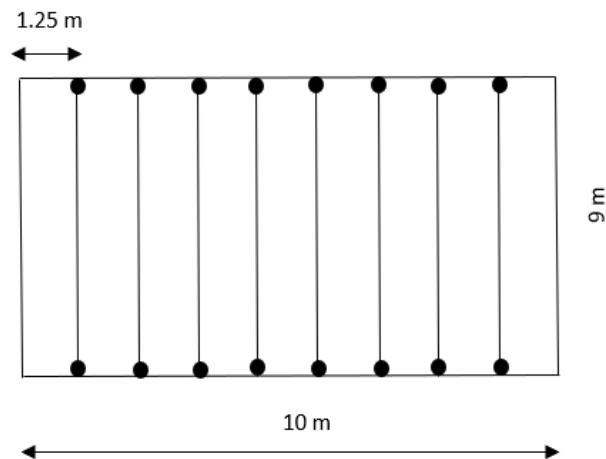
Ιδιοσυχνότητα, για συνήθη κτίρια με βάση το Εθνικό Προσάρτημα του EN1993-1-1:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1.571}{L}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1.571}{1.25}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{3300 \cdot 8333.33 \cdot 10^{-4}}{0.41}} = 20 \text{ Hz} > 3 \text{ Hz} \quad (5-46)$$

Επομένως, τελικά η σύμμικτη πλάκα που επιλέξαμε ικανοποιεί όλους τους ελέγχους.

5.3 Διαστασιολόγηση σύμμικτων δευτερευουσών δοκών

Η διαστασιολόγηση της σύμμικτης δευτερεύουσας δοκού έγινε στο πρόγραμμα *Arcelor Mittal Beams Calculator*. Τοποθετούνται οκτώ (8) δευτερεύουσες δοκοί παράλληλα προς τον άξονα Y ανά 1,25 m καλύπτοντας ένα πλάτος 10 m, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-3.



Σχήμα 5-3: Διάταξη των δευτερευουσών σύμμικτων δοκών κατά την διεύθυνση Y

Επιλέγεται μεταλλική διατομή HEA200 με ποιότητα χάλυβας S355 και συνολικό πάχος σύμμικτης πλάκας 0.13 m, όπως υπολογίστηκε προηγουμένως.

$$I_{B, \text{συμμ}} = 0.00538 \text{ m}^2 \cdot 78.5 \text{ kN/m}^3 + 2.15 \text{ kN/m} = 2.57 \text{ kN/m} \quad (5-47)$$

$$\eta = E_a / E_c = 210 / 33 = 6.36 \quad (5-48)$$

$$A_a = 53.8 \text{ cm}^2 \quad (5-49)$$

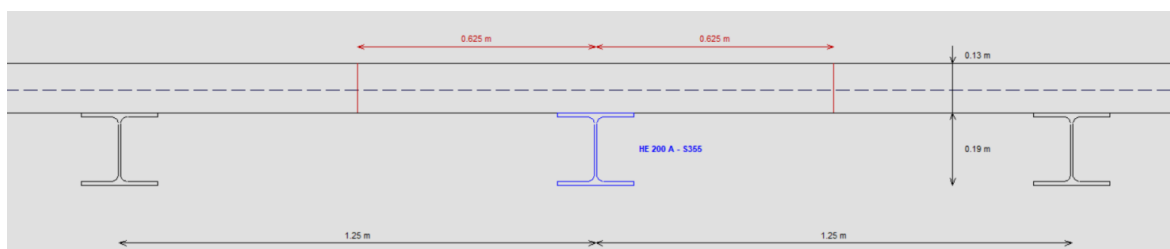
$$A_c = 13 \cdot 125 = 1625 \text{ cm}^2 \quad (5-50)$$

$$A_e = A_a + \frac{A_c}{\eta} = 309.30 \text{ cm}^2 \quad (5-51)$$

$$I_c = \frac{bd^3}{12} = \frac{125 \cdot 13^3}{12} = 22885.42 \text{ cm}^4 \quad (5-52)$$

$$z_e = \frac{A_a z_a + A_c z_n / \eta}{A_e} = \frac{53.8 \cdot 95 + 1625 \cdot 6.5 / 6.36}{309.30} = 21.89 \text{ cm} \quad (5-53)$$

$$I_e = I_{a,0} + A_a (z_a - z_e)^2 + \frac{I_{c,e}}{\eta} + \frac{A_c}{\eta} (z_c - z_e)^2 = 355369.67 \text{ cm}^4 \quad (5-54)$$



Σχήμα 5-4: Σχεδιασμός της σύμμικτης δοκού στο πρόγραμμα Arcelor Mittal Beams

$$f_{ad} = f_{yd} = f_y / \gamma_{M0} = 35.5 / 1.0 = 35.5 \text{ kN/cm}^2 \quad (5-55)$$

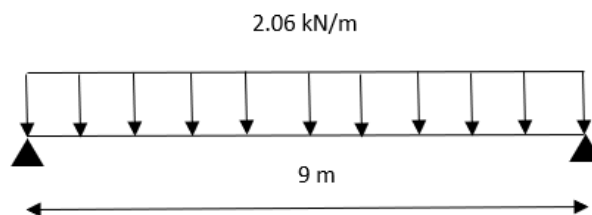
$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 3 / 1.5 = 2 \text{ kN/cm}^2 \quad (5-56)$$

$$f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s = 50 / 1.15 = 43.478 \text{ kN/cm}^2 \quad (5-57)$$

$$A_{s1} = 5.24 \cdot 1.25 = 6.55 \text{ cm}^2, \text{ άνω οπλισμός σε απόσταση } z_{s1} = 5 \text{ cm} \text{ από άνω ίνα πλάκας} \quad (5-58)$$

$$A_{s2} = 3.35 \cdot 1.25 = 4.19 \text{ cm}^2, \text{ κάτω οπλισμός σε απόσταση } z_{s2} = 10 \text{ cm} \text{ από άνω ίνα πλάκας} \quad (5-59)$$

Για την δευτερεύουσα δοκό ισχύει:



Σχήμα 5-5: Καταμεμημένο φορτίο κατά μήκος της σύμμικτης δοκού

Το συνολικό κατανεμημένο φορτίο που ασκείται στις κύριες δοκούς στη διεύθυνση X και Y είναι ίσο με:

$$2.57 \text{ kN/m} / 1.25 \text{ m} = 2.06 \text{ kN/m}^2 \quad (5-60)$$

Το φορτίο αυτό εισάγεται στο πρόγραμμα Robot πάνω στην επιφάνεια του κάθε ορόφου.

Θετική Πλαστική Ροπή Αντοχής

Εφελκυστική δύναμη χαλύβδινης διατομής:

$$Z = A_a \cdot f_{ad} = 53.8 \cdot 35.5 = 1909.90 \text{ kN} \quad (5-61)$$

Θλιπτική δύναμη πλάκας:

$$D = A_c \cdot 0.85f_{cd} = 1625 \cdot 0.85 \cdot 2 = 2762.5 \text{ kN} \quad (5-62)$$

Εφόσον προκύπτει ότι $D > Z$, για θετικές ροπές ο πλαστικός ουδέτερος άξονας (ΟΑ) βρίσκεται εντός της πλάκας. Η απόσταση του ΟΑ από την άνω ίνα της πλάκας είναι:

$$z_0 = \frac{Z}{b \cdot 0.85f_{cd}} = \frac{1909.90}{125 \cdot 0.85 \cdot 2} = 8.99 \text{ cm} < d = 13 \text{ cm} \quad (5-63)$$

$$M_{pl, Rd}^+ = Z \cdot (z_a - \frac{z_0}{2}) = 1909.90 \cdot (0.095 - \frac{0.090}{2}) = 95.50 \text{ kNm} \quad (5-64)$$

Ολόκληρη η χαλύβδινη διατομή εφελκύεται, οπότε είναι κατηγορίας 1 και γίνεται σχεδιασμός με βάση την πλαστική ροπή αντοχής.

Αρνητική Πλαστική Ροπή Αντοχής

Αγνοείται η επιρροή του σκυροδέματος, αφού βρίσκεται σε εφελκυσμό. Έστω ότι λαμβάνεται υπόψη ο οπλισμός του σκυροδέματος, οπότε η αντοχή υπολογίζεται για τη ρηγματωμένη σύμμικτη κατασκευή.

$$D = A_a \cdot f_{ad} = 53.8 \cdot 35.5 = 1909.90 \text{ kN} \quad (5-65)$$

$$Z_{s1} = A_{s1} \cdot f_{sd} = 6.55 \cdot 43.478 = 284.78 \text{ kN} < D \quad (5-66)$$

Δηλαδή ο ΟΑ βρίσκεται εντός της χαλύβδινης διατομής

$$Z_{s2} = A_{s2} \cdot f_{sd} = 4.19 \cdot 43.478 = 182.17 \text{ kN} \quad (5-67)$$

Υποθέτουμε ότι ο ΟΑ βρίσκεται εντός του άνω πέλματος της σιδηροδοκού:

$$z_0 = d + \frac{D - Z_{s1} - Z_{s2}}{2b_f \cdot f_{ad}} = 13 + \frac{1909.90 - 284.78 - 182.17}{2 \cdot 20 \cdot 35.5} = 14.02 \text{ cm} > d + t_{fo} = 14 \text{ cm} \quad (5-68)$$

Άρα ο ΟΑ βρίσκεται εντός του κορμού της σιδηροδοκού.

Εφελκυστική δύναμη άνω πέλματος και κορμού:

$$Z_f = 2 \cdot f_{yd} \cdot b_{fo} \cdot t_{fo} = 2 \cdot 35.5 \cdot 20 \cdot 1.0 = 1420 \text{ kN} \quad (5-69)$$

$$Z_w = 2 \cdot f_{yd} \cdot t_w \cdot (z_0 - d - t_{fo}) = 2 \cdot 35.5 \cdot 0.65 \cdot (20.07 - 13 - 1.0) = 280.13 \text{ kN} \quad (5-70)$$

$$z_0 = d + t_{fo} + \frac{D - Z_{s1} - Z_{s2} - Z_f}{2f_{yd}t_w} = 13 + 1.0 + \frac{1909.90 - 284.78 - 182.17 - 1420}{2 \cdot 35.5 \cdot 0.65} = 14.50 \text{ cm} \quad (5-71)$$

Ισχύει ότι: $d + t_{f0} = 14 \text{ cm} < z_0 = 14.50 \text{ cm} < h_{\text{tot}} - t_{f0} = 31 \text{ cm}$, άρα όντως ο ΟΑ βρίσκεται εντός του κορμού της σιδηροδοκού.

Έλεγχος έναντι τέμνουσα (ΟΚΑ)

$$V_{pl,Rd} = 370.59 \text{ kN} > V_{Ed,max} = 28.45 \text{ kN}, \text{ η διατομή επαρκεί} \quad (5-72)$$

Πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση τέμνουσας και κάμψης και στη συνέχεια να γίνει ο υπολογισμός της ροπής αντοχής με απομειωμένη τάση διαρροής κορμού $(1 - \rho) \cdot f_y$.

$$\rho = (2V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2 = 0.7 \quad (5-73)$$

$$M_{pl,Rd} = \sum(F_i z_i) - Z_{s1} z_{s1} - Z_{s2} z_{s2} - Z_f (d + \frac{t_{f0}}{2}) - Z_w (\frac{z_0 + d + t_{f0}}{2}) = 72.75 \text{ kNm} \quad (5-74)$$

Ένα μέρος του κορμού υπόκειται σε κάμψη και ένα σε θλίψη:

$$a_c = 20.07 - 13 = 7.07 > 0.5, c = 19 \text{ cm} \quad (5-75)$$

$$\text{Κορμός: } c / t_w = 13.4 / 0.65 = 20.62 < \frac{126\epsilon}{5.5 \cdot \alpha - 1} = 97.52 \rightarrow \text{κατηγορία 1} \quad (5-76)$$

$$\text{Κάτω πέλμα: } c / t_{f0} = (19 / 2 - 0.65 / 2 - 1.8) / 1.0 = 7.38 < 10\epsilon = 8.1 \rightarrow \text{κατηγορία 2} \quad (5-77)$$

Συνολικά η διατομή ανήκει στην κατηγορία 2, άρα επιτρέπεται ο σχεδιασμός με βάση την πλαστική ροπή αντοχής.

Προσδιορισμός διαμήκους διάτμησης

Πλαστική ανάλυση διαμήκους διάτμησης γίνεται με τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Οικοδομικό έργο
- Διατομή κατηγορίας 1 ή 2
- Ήλοι όλκιμοι: $\begin{cases} 16\text{mm} \leq d \leq 22\text{mm} \\ h \geq 4d \end{cases}$

Οριακή κατάσταση αστοχίας

Επιλέγονται διατμητικοί ήλοι με διάμετρο $d = 19 \text{ mm}$, άρα το ύψος τους πρέπει να είναι: $h \geq 76 \text{ mm}$.

$$\text{Κρίσιμο μήκος: } l_k = \frac{9}{2} = 4.5 \text{ m} \quad (5-78)$$

$$N_{pl,a,Rd} = f_{ad} \cdot A_a = 35.5 \cdot 53.8 = 1909.90 \text{ kN} \quad (5-79)$$

$$D_{c,pl,Rd} = 0.85f_{cd} \cdot A_c = 0.85 \cdot 2 \cdot 1625 = 2762.5 \text{ kN} \quad (5-80)$$

$$V_l = \min(N_{pl,a,Rd}; D_{c,pl,Rd}) = 1909.90 \text{ kN} \quad (5-81)$$

$$p_{Ed} = 8.82 \text{ kN/m}^2 \cdot \frac{1.25\text{m}}{2} = 5.51 \text{ kN/m} \quad (5-82)$$

$$M_{Ed} = p_{Ed} \cdot \frac{l^2}{8} = 55.79 \text{ kNm} < M_{pl,Rd}^+ = 95.50 \text{ kNm} \quad (5-83)$$

$$\text{Επικάλυψη ράβδων οπλισμού: } C_{\text{nom}} = 40 - \frac{\phi_{19}}{2} = 30.5 \text{ mm} \quad (5-84)$$

$$\text{Επικάλυψη ήλων: } C_{\text{studs}} = \max(C_{\text{nom}} - 5; 20) = 25.5 \text{ mm} \quad (5-85)$$

$$\text{Ύψος ήλου: } h \leq 130 - C_{\text{studs}} = 104.5 \text{ mm} \rightarrow h = 100 \text{ mm} \quad (5-86)$$

$$h / d = 100 / 19 = 5.26 > 4 \rightarrow \alpha = 1 \quad (5-87)$$

Πίνακας 5-3: Οι διαστάσεις των διατμητικών ήλων κεφαλής

$P_{Rd,s} = 0.8 \cdot f_u \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4}\right) / \gamma_v$	$P_{Rd,c} = 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} / \gamma_v$		$\alpha = 0.2 \left(\frac{h}{d} + 1\right)$ για $3 \leq \frac{h}{d} \leq 4$ $\alpha = 1$ για $4 < \frac{h}{d}$
Τυπικές διαστάσεις διατμητικών ήλων κεφαλής:	d	d ₂	h
	16	29	50, 75, 100, 125, 150, 175, 200
	19	32	75, 100, 125, 150, 200
	22	35	50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250
	25	38	100, 125, 150, 175, 200, 250

Οριακή αντοχή ήλου εντός συμπαγούς πλάκας:

$$P_{Rd} = \min(P_{Rd,s}; P_{Rd,c}) = \min\left(0.8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} / \gamma_v; 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v}\right) = 83.33 \text{ kN} \quad (5-88)$$

Επιλογή Διατμητικής Σύνδεσης

Θεωρούμε ότι έχουμε μερική διατμητική σύνδεση ($M_{Ed} < M_{pl,Rd}$) στις περιοχές θετικών ροπών.

$$2.5M_{pl,a,Rd} = 314.18 \text{ kNm} > M_{pl,Rd} = 95.50 \text{ kNm} \quad (5-89)$$

Άρα επιτρέπεται να γίνει ομοιόμορφη κατανομή των διατμητικών ήλων.

$$\text{Απαιτούμενοι ήλοι: } n_f = \frac{V_l}{P_{Rd}} = \frac{1909.90}{83.33} = 23 \quad (5-90)$$

Άρα συνολικά τοποθετούνται 24 ήλοι στην μισή διατομή.

Για $L_e = 9 \text{ m} < 25 \text{ m}$, χάλυβα S355 και συμμετρική διατομή:

$$\eta = 1 - \left(\frac{355}{f_y}\right)(0.75 - 0.03L_e) = 0.52 > 0.4 \quad (5-91)$$

Οριακή ροπή σύμμικτης δοκού με μερική διάτμηση:

$$M_{Rd} = M_{pl,a,Rd} + \eta \cdot (M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}) \quad (5-92)$$

$$M_{pl,a,Rd} = f_y \cdot W_{pl,a} = 35.5 \cdot 429 = 152.30 \text{ kNm} \quad (5-93)$$

$$\text{Θεωρούμε: } M_{Rd} = M_{Ed} = 55.79 \text{ kNm} \rightarrow \eta_{\text{απ}} = \frac{55.79 - 152.30}{95.50 - 152.30} = 1.7 \quad (5-94)$$

Για κύριες δοκούς πλαισίων σε σεισμικές περιοχές ισχύει ότι: $\eta_{\text{επιτρ}} \geq 0.8$.

Λαμβάνοντας τη δυσμενέστερη τιμή:

$$\eta = 1.17 \rightarrow n = 1.7 \cdot n_f = 1.7 \cdot 24 = 42 \text{ ήλοι για ολόκληρη τη δοκό} \quad (5-95)$$

$$\text{Διαμήκης απόσταση: } e_L = 900 / 42 = 21 \text{ cm} \quad (5-96)$$

Άρα τοποθετείται 1 ήλος M19/210.

Έλεγχος γεωμετρικών απαιτήσεων:

$$\text{Διαμήκης απόσταση } e_L: 5d = 95 \text{ mm} < e_L = 210 \text{ mm} < \min(6h_c; 800) = 780 \quad (5-97)$$

$$\text{Εγκάρσια απόσταση μεταξύ ήλων: } \min e_T = 2.5d = 47.5 \text{ mm} \rightarrow e_T = 60 \text{ mm} \quad (5-98)$$

$$\text{Εγκάρσια απόσταση ακραίου ήλου από το άκρο του πέλματος: } \min e_R = 20 \text{ mm} \quad (5-99)$$

Οι πρόσθετοι περιορισμοί για θλιβόμενα άνω πέλματα ισχύουν όταν έχουμε κατηγορία 3 ή 4, οπότε σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτούνται να ελεγχθούν, αφού το πέλμα είναι κατηγορίας 1.

Μεταβιβαζόμενη διαμήκης διάτμηση για M19/210:

$$v_{l,Rd} = \frac{n \cdot P_{Rd}}{e_L} = \frac{1 \cdot 83.33}{0.21} = 396.81 \text{ kN/m} \quad (5-100)$$

Έλεγχος σύμμικτης πλάκας σε διαμήκη διάτμηση

Ελάχιστο ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού:

$$\rho_{\min} = \frac{A_{sf}}{s_f h_c} = 0.16 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0.16 \frac{2.9}{500} = 0.093 \% \quad (5-101)$$

Πλέγμα Φ8/250 άνω και κάτω:

$$A_{sf} / s_f = \rho_{\min} \cdot h_c = 0.00093 \cdot 130 = 0.12 \text{ mm} = 1.2 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (5-102)$$

$$A_{sf} / s_f = 2 \cdot (\pi \cdot 0.8^2 / 4) / 0.25 = 4.02 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (5-103)$$

$$\text{Διατμητική ροή: } v_{l,Ed} = \frac{V_l}{l_k} = \frac{1909.90}{4.5} = 424.42 \text{ kN/m} \quad (5-104)$$

Έλεγχος τομής a-a:

Δρώσα διατμητική ροή:

$$V_{l,c,Ed} = v_{l,Ed} \cdot \frac{A_{cp,eff}}{A_{c,tot,eff}} = 424.42 \cdot \frac{125-13}{2} / 125 = 190.14 \text{ kN/m} \quad (5-105)$$

Έλεγχος αντοχής λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος:

$$V_{c,Rd} = \frac{0.75 \cdot L_v \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = 1438.52 \text{ kN/m} > V_{l,c,Ed} \quad (5-106)$$

Έλεγχος αντοχής εγκάρσιων οπλισμών:

$$V_{s,Rd} = \frac{A_{sf}}{s_f} \cdot f_{sd} \cdot \cot\theta = 209.8 \text{ kN/m} > V_{l,c,Ed} \quad (5-107)$$

Έλεγχος τομής b-b:

$$V_{l,c,Ed} = v_{l,Ed} = 424.42 \text{ kN/m} \quad (5-108)$$

$$L_v = 2h + 2d_2 + e_T = 2 \cdot 100 + 2 \cdot 32 + 60 = 324 \text{ mm} \quad (5-109)$$

$$V_{c,Rd} = \frac{0.75 \cdot L_v \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{0.75 \cdot 0.324 \cdot 30000}{1.2 + 1/1.2} = 3585.25 \text{ kN/m} > V_{lc,Ed} \quad (5-110)$$

$$V_{s,Rd} = \frac{A_{sf}}{s_f} \cdot f_{sd} \cdot \cot\theta = 4.02 \cdot 43.478 \cdot 1.2 = 209.8 \text{ kN/m} > V_{lc,Ed} \quad (5-111)$$

Άρα ικανοποιούνται όλοι οι έλεγχοι.

Έλεγχος ρηγμάτωσης (ΟΚΛ)

$$\text{Ελάχιστος οπλισμός ρηγμάτωσης: } A_{s,min} = k_s \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s \quad (5-112)$$

Απόσταση του κέντρου βάρους της αρηγμάτωσης διατομής από το κέντρο βάρους της πλάκας:

$$z_0 = \frac{A_a \cdot z_a}{A_a + A_c/n_0} = 1.65 \text{ cm} \quad (5-113)$$

$$k_c = \frac{z_0}{z_0 + h_c/2} + 0.3 = 0.5 < 1 \quad (5-114)$$

$$\sigma_{s1,0} = M_{Ek} / W_{s1} = 1.86 \text{ MPa} \quad (5-115)$$

$$W_{s1} = \frac{I_e}{z_e - z_{s1}} = \frac{355369.67}{21.89 - 5.0} = 21040.24 \text{ cm}^3 \quad (5-116)$$

Πρόσθετη τάση λόγω συμμετοχής του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών:

$$\Delta\sigma_s = \frac{0.4 \cdot f_{cm}}{\alpha_{st} \cdot \rho_s} = \frac{0.4 \cdot 3.8}{55.37 \cdot 0.007} = 3.92 \text{ MPa} \quad (5-117)$$

$$\alpha_{st} = \frac{A_e \cdot I_e}{A_a \cdot I_a} = \frac{309.30 \cdot 355369.67}{53.8 \cdot 3690} = 55.37 \quad (5-118)$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{A_{ct}} = \frac{6.55 + 4.19}{1625} = 0.007 = 0.7\% \quad (5-119)$$

Τάση άνω στρώσης οπλισμού μετά την ρηγμάτωση:

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s1,0} + \Delta\sigma_s = 1.86 + 3.92 = 5.78 \text{ MPa} \quad (5-120)$$

Εκτιμώμενη τάση οπλισμού κατά τη ρηγμάτωση:

$$\sigma_s = 160 \text{ MPa} \quad (5-121)$$

$$\text{Άρα: } A_{s,min} = 0.9 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 3 \cdot 1625 / 160 = 10.97 \text{ cm}^2 \quad (5-122)$$

Πίνακας 5-4: Επιλογή μέγιστης διαμέτρου ράβδου με βάση την τάση οπλισμού και το άνοιγμα ρωγμής

Τάση οπλισμού σ_s σε MPa	Μέγιστη διάμετρος ράβδου Φ^* (mm) για άνοιγμα ρωγμής w_k		
	$w_k = 0,4 \text{ mm}$	$w_k = 0,3 \text{ mm}$	$w_k = 0,2 \text{ mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	—

Πίνακας 5-5: Μέγιστες αποστάσεις ράβδου με βάση την τάση οπλισμού και το άνοιγμα ρωγμής

Τάση οπλισμού σ_s σε MPa	Μέγιστη απόσταση ράβδου για άνοιγμα ρωγμής w_k		
	$w_k = 0,4$ mm	$w_k = 0,3$ mm	$w_k = 0,2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	—
360	100	50	—

Μέγιστες αποστάσεις οπλισμού υψηλής συνάφειας

Για $\sigma_s = 160$ MPa και για άνοιγμα ρωγμής $w_k = 0.4$ mm, προκύπτει μέγιστη διάμετρος οπλισμού $\Phi 40$ και μέγιστη απόσταση ράβδων 300 mm, οπότε οι τοποθετούμενοι οπλισμοί $\Phi 10/150$ και $\Phi 8/150$ ικανοποιούν τις απαιτήσεις και η διατομή επαρκεί έναντι ρηγματώσης.

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

Κατά τη φάση κατασκευής, πρέπει να γίνει ο έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό της μεταλλικής διατομής HEA200, εφόσον υπάρχει στροφική δέσμευση από το χαλυβδόφυλλο προς το θλιβόμενο τμήμα της δοκού, η οποία προσομοιώνεται με την προσθήκη ενός στροφικού ελατηρίου σταθεράς c_θ . Ο έλεγχος αυτός δεν πραγματοποιείται στο πρόγραμμα ABC και γι' αυτό υπολογίζεται αναλυτικά στο χέρι. Η κρίσιμη ροπή λυγισμού υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2}{\pi^2} \cdot \frac{G \cdot I_{t,eq}}{E \cdot I_z} + \frac{c_\theta}{E \cdot I_z} \cdot \frac{(k \cdot L)^4}{\pi^4}} \quad (5-123)$$

όπου:

 $I_{t,eq}$: η ισοδύναμη ροπή στρέψης c_θ : η ολική σταθερά του στροφικού ελατηρίου

$$I_{t,eq} = I_t + c_\theta \cdot \frac{(kL)^2}{G \cdot \pi^2} \quad (5-124)$$

$$\frac{1}{c_\theta} = \frac{1}{c_{\theta,e}} + \frac{1}{c_{\theta,\sigma}} + \frac{1}{c_{\theta,p}} \quad (5-125)$$

όπου:

 $c_{\theta,e}$: η σταθερά ελατηρίου λόγω παραμόρφωσης του χαλυβδόφυλλου $c_{\theta,\sigma}$: η σταθερά ελατηρίου λόγω παραμόρφωσης της σύνδεσης η οποία ισούται με 5.2 kNm/m όταν το χαλυβδόφυλλο συνδέεται στο κάτω στενό πέλμα τους με τη δοκό $c_{\theta,p}$: η σταθερά ελατηρίου λόγω παραμόρφωσης της διατομής

$$c_{\theta,e} = k \cdot \frac{EI}{\alpha} \quad (5-126)$$

όπου:

k: είναι ίσο με 2 για αμφιέρειστα φύλλα ή συνεχή δύο ανοιγμάτων

α: η απόσταση δύο διαδοχικών στηρίξεων του χαλυβδόφυλλου

$$c_{\theta,p} = 5770 \cdot \frac{1}{\frac{h}{t_w^3} + c \cdot \frac{b_f}{t_f^3}} \quad (5-127)$$

όπου:

h: το ύψος της διατομής

b_f: το πλάτος του πέλματος

t_f: το πάχος του πέλματος

t_w: το πάχος του κορμού

c: είναι ίσο με 0.5 για διατομές διπλού ταυ

Πίνακας 5-6: Χαρακτηριστικά μεγέθη της μεταλλικής διατομής HEA200

I _z [cm ⁴]	I _w [cm ⁶]	I _t [cm ³]	W _{pl,y} [cm ³]	f _y [kN/cm ²]	M _{pl,y} [kNm]
1340	108000	21.1	429	35.5	103

Πίνακας 5-7: Παράμετροι υπολογισμού της σταθεράς c_{θ,p}

h [cm]	t _w [cm]	b _f [cm]	t _f [cm]	c [cm]
19	0.65	20	1	0.5

Πίνακας 5-8: Παράμετροι υπολογισμού της σταθεράς c_{θ,e}

k	α	I [m ⁴ /m]
2	1.25	106.15E-08

Πίνακας 5-9: Οι τιμές των σταθερών ελατηρίου

c _{θ,e} [kNm/m]	c _{θ,σ} [kNm/m]	c _{θ,p} [kNm/m]	c _θ [kNm/m]
356.66	5.2	72.87	2.056

Πίνακας 5-10: Υπολογισμός της κρίσιμης ροπής

E [kPa]	G [kPa]	C ₁	k	L [m]	M _{cr} [kNm]
210000000	81000000	1.132	1	9	904.22

Πίνακας 5-11: Υπολογισμός της ροπής αντοχής έναντι στρεπτικαμπτικού λυγισμού με στροφική δέσμευση

λ _{LT}	α _{LT}	Φ _{LT}	χ _{LT}	M _{b,Rd} [kNm]
0.41	0.21	0.61	0.74	112.70

Τελικά ισχύει: M_{b,Rd} = 112.70 kNm > M_{Ed,max}^{constr.stage} = 63.99 kNm (5-128)

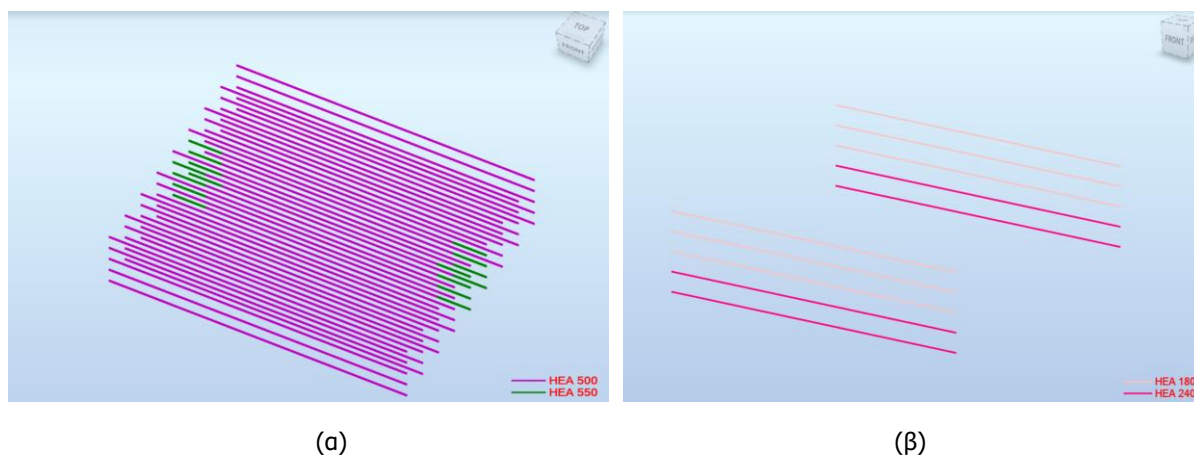
Τα αποτελέσματα της επίλυσης της σύμμικτης δοκού μέσω του προγράμματος ABC παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α: Αποτελέσματα Σύμμικτης Πλακασ-Δοκού.

5.4 Διαστασιολόγηση κύριων δοκών κατά Χ

Οι κύριες δοκοί κατά την διεύθυνση Χ έχουν μεταλλική διατομή. Οι εξωτερικοί δοκοί μαζί με τα υποστυλώματα λειτουργούν ως πλαίσια και δέχονται τα φορτία που τους ασκούν οι δοκοί κατά Υ, οι οποίες στηρίζονται πάνω σε αυτές. Στις εσωτερικές μόνο δοκούς των πλαισίων τοποθετούνται ελευθερώσεις ροπής στην αρχή κάθε μέλους κατά Χ και στην αρχή και στο τέλος του μέλους κατά Υ και Ζ, προκειμένου να μειωθεί η ροπή που δέχονται τα υποστυλώματα στον ασθενή τους άξονα. Η

διαστασιολόγησή τους γίνεται από το Robot για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης Ο.Κ.Α., ενώ ταυτόχρονα ελέγχεται και το μέγιστο βέλος κάμψης τους και το βέλος λόγω κινητών φορτίων για τους συνδυασμούς Ο.Κ.Λ το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή $L/250$ και $L/350$ αντίστοιχα, σύμφωνα με τους κανονισμούς του EN1993-1-1.

Εισάγονται, επίσης, στο πρόγραμμα τα μήκη λυγισμού ξεχωριστά για τις εξωτερικές και τις εσωτερικές δοκούς, καθώς έχουν διαφορετικό μήκος λυγισμού. Δημιουργούνται τα κατάλληλα groups, ανάλογα με τον βαθμό εκμετάλλευσής τους. Γενικά, έγινε η προσπάθεια να εισαχθεί η ίδια διατομή για τις δοκούς του 1^{ου}-2^{ου} ορόφου και ξεχωριστή διατομή για τις δοκούς του 3^{ου}-4^{ου}-5^{ου} ορόφου. Τελικά, έπειτα από αρκετούς ελέγχους έγινε η επιλογή της δυσμενέστερης διατομής HEA500 για όλες τις εσωτερικές δοκούς. Οι δοκοί που βρίσκονται κάτω από το πλαίσιο στο οποίο θα τοποθετηθεί το κλιμακοστάσιο, δέχονται μεγαλύτερο φορτίο και για αυτές επιλέχθηκε διατομή HEA550. Οι εξωτερικές δοκοί διαστασιολογήθηκαν ξεχωριστά και επιλέχθηκαν οι διατομές HEA180 και HEA240, όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 5-6. Παρακάτω, φαίνονται αναλυτικά οι διατομές των δοκών κατά Χ και ο έλεγχος της δυσμενέστερης δοκού, ανάλογα με το group στο οποίο ανήκει. Στον Πίνακα 5-12 φαίνονται οι βαθμοί εκμετάλλευσης σύμφωνα με τον κρίσιμότερο έλεγχο της κάθε διατομής ανάλογα με το group member στο οποίο ανήκει.



Σχήμα 5-6: Διαστασιολόγηση των κύριων (α) εσωτερικών και (β) εξωτερικών δοκών κατά Χ

Πίνακας 5-12: Βαθμός εκμετάλλευσης της δυσμενέστερης διατομής για τις δοκούς κατά Χ

Εσωτερικές δοκοί		
Διατομή	Βαθμός εκμετάλλευσης	Κρίσιμος έλεγχος
HEA 500	91 %	Κάμψη και θλίψη
HEA 550	86 %	Κάμψη και θλίψη
Εξωτερικές δοκοί		
Διατομή	Βαθμός εκμετάλλευσης	Κρίσιμος έλεγχος
HEA 180	77 %	Κάμψη
HEA 240	73 %	Κάμψη και θλίψη

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code 1 int beams X
 Bar: 536 int beams x_536
 Point / Coordinate: 2 / x = 0.50 L = 5.00 m
 Load case: 41 ULS5 (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.35+(9+10+11)*1.50+(14+35)*0

Section OK

HEA 500

Simplified results Detailed results

FORCES

$N_{,Ed} = 0.00 \text{ kN}$	$M_{y,Ed} = 1269.30 \text{ kN}\cdot\text{m}$
$N_{c,Rd} = 7012.60 \text{ kN}$	$M_{y,Ed,max} = 1269.30 \text{ kN}\cdot\text{m}$
$N_{b,Rd} = 6176.55 \text{ kN}$	$M_{y,c,Rd} = 1401.92 \text{ kN}\cdot\text{m}$
	$M_{N,y,Rd} = 1401.92 \text{ kN}\cdot\text{m}$
	$M_{b,Rd} = 1401.92 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Class of section = 1

LATERAL BUCKLING

$z = 0.00$	$M_{cr} = 40093.37 \text{ kN}\cdot\text{m}$	Curve,LT - b	$X_{LT} = 1.00$
$L_{cr,upp} = 1.20 \text{ m}$	$\lambda_{m,LT} = 0.19$	$f_{i,LT} = 0.48$	$X_{LT,mod} = 1.00$

BUCKLING y

$L_y = 10.00 \text{ m}$	$\lambda_{m,y} = 0.62$
$L_{cr,y} = 10.00 \text{ m}$	$\chi_y = 0.88$
$\lambda_{m,y} = 47.66$	$\kappa_{yy} = 1.00$

BUCKLING z

$L_z = 10.00 \text{ m}$	$\lambda_{m,z} = 0.22$
$L_{cr,z} = 1.20 \text{ m}$	$\chi_z = 0.99$
$\lambda_{m,z} = 16.56$	$\kappa_{zy} = 0.52$

SECTION CHECK

$M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} = 0.91 < 1.00$ (6.2.5.(1))

MEMBER STABILITY CHECK

$\lambda_{m,y} = 47.66 < \lambda_{m,max} = 210.00$ $\lambda_{m,z} = 16.56 < \lambda_{m,max} = 210.00$ STABLE

$N_{,Ed}/(\chi_y \cdot N_{,Rk}/\gamma_{M1}) + \kappa_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}) = 0.91 < 1.00$ (6.3.3.(4))

OK

Change

Forces

Detailed

Calc. Note

Parameters

Help

Σχήμα 5-7: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εσωτερικής δοκού HEA500 κατά X για Ο.Κ.Α

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code 1 int beams X
 Bar: 2684 int beams x_2684

Section OK

HEA 500

Displacements Detailed results

Bar deflection

$u_y = 0.0 \text{ cm} < u_{y,max} = L/200.00 = 5.0 \text{ cm}$	Verified
Governing load case: 152 SLS15	
$u_z = 3.4 \text{ cm} < u_{z,max} = L/200.00 = 5.0 \text{ cm}$	Verified
Governing load case: 147 SLS10 (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11)*1.00+12*0.50	
$u_{inst,y} = 0.0 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/200.00 = 5.0 \text{ cm}$	Verified
Governing load case: $0.7*9 + 0.7*10 + 0.7*11 + 1*16 + 1*36$	
$u_{inst,z} = 0.4 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/200.00 = 5.0 \text{ cm}$	Verified
Governing load case: $1*15 + 1*34$	

Member node displacements

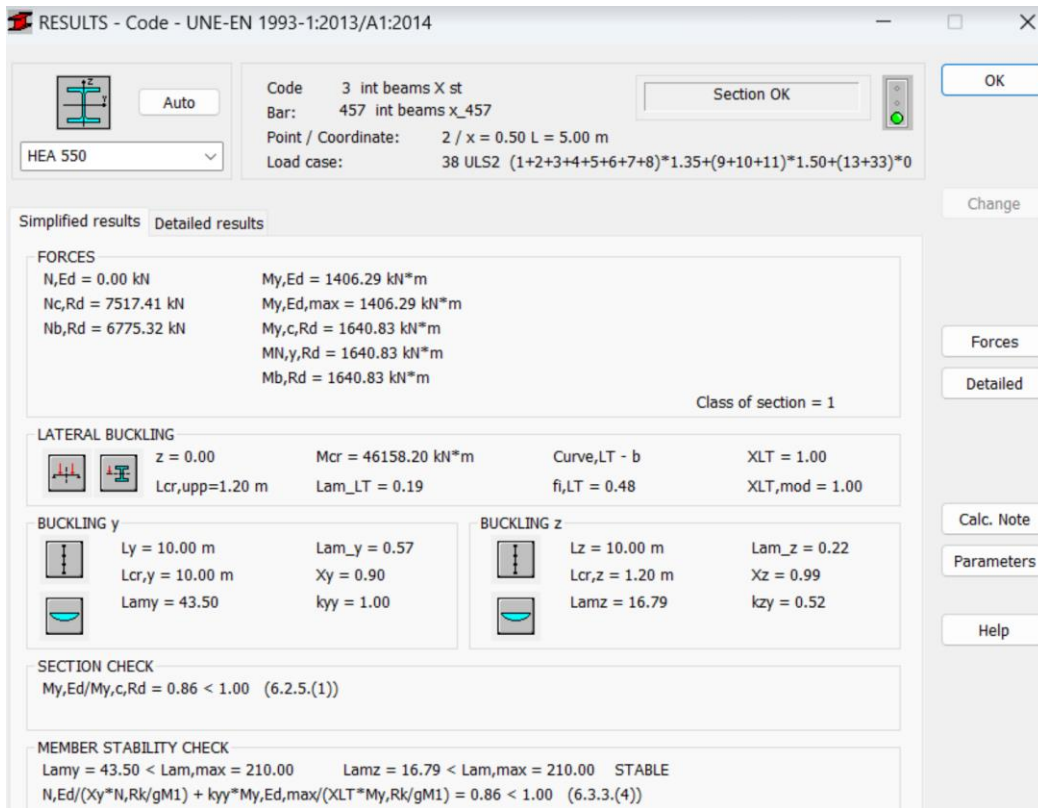
OK

Change

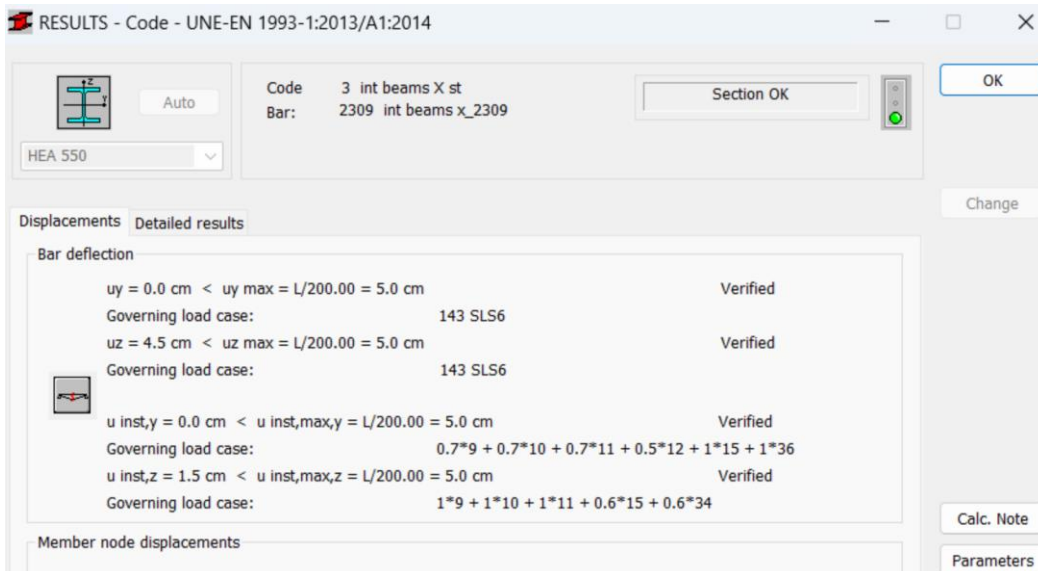
Calc. Note

Parameters

Σχήμα 5-8: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εσωτερικής δοκού HEA500 κατά X για Ο.Κ.Λ.



Σχήμα 5-9: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εσωτερικής δοκού HEA550 κατά X για Ο.Κ.Α.



Σχήμα 5-10: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εσωτερικής δοκού HEA550 κατά X για Ο.Κ.Α.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code 4 ext beams X 3,4,5
 Bar: 2047 ext beams x_2047
 Point / Coordinate: 1 / x = 0.00 L = 0.00 m
 Load case: 68 ULS32 (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.35+(9+10+11)*1.05+(14+35)*

HEA 180

Section OK

OK

Simplified results Detailed results

FORCES

$M_{y,Ed} = -84.79 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{z,Ed} = -2.06 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$V_{y,Ed} = -4.94 \text{ kN}$
$M_{y,pl,Rd} = 115.33 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{z,pl,Rd} = 55.56 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$V_{y,c,Rd} = 777.44 \text{ kN}$
$M_{y,c,Rd} = 115.33 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{z,c,Rd} = 55.56 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$V_{z,Ed} = 105.46 \text{ kN}$
		$V_{z,c,Rd} = 296.60 \text{ kN}$
$M_{b,Rd} = 115.33 \text{ kN}\cdot\text{m}$		

Class of section = 2

LATERAL BUCKLING

$z = 0.00$	$M_{cr} = 16664.51 \text{ kN}\cdot\text{m}$	Curve,LT - b	$XLT = 1.00$
$L_{cr,low} = 0.33 \text{ m}$	$Lam_{LT} = 0.08$	$\phi_{LT} = 0.45$	$XLT_{mod} = 1.00$

BUCKLING y

BUCKLING z

SECTION CHECK

$M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} = 0.74 < 1.00$ (6.2.5.(1))
 $V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.36 < 1.00$ (6.2.6.(1))

MEMBER STABILITY CHECK

$M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}) + M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/\gamma_{M1}) = 0.77 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Change

Forces

Detailed

Calc. Note

Parameters

Help

Σχήμα 5-11: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εξωτερικής δοκού HEA180 κατά X για Ο.Κ.Α.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code 4 ext beams X 3,4,5
 Bar: 2050 ext beams x_2050

HEA 180

Section OK

OK

Displacements Detailed results

Bar deflection

$u_y = 0.1 \text{ cm} < u_{y \text{ max}} = L/200.00 = 1.3 \text{ cm}$	Verified
Governing load case: 186 SLS49 (1+2+3+4+5+6+7+8+16+36)*1.00+12*0.50	
$u_z = 0.1 \text{ cm} < u_{z \text{ max}} = L/200.00 = 1.3 \text{ cm}$	Verified
Governing load case: 156 SLS19 (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11+13+33)*1.00	
$u_{inst,y} = 0.1 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/200.00 = 1.3 \text{ cm}$	Verified
Governing load case: $0.5 \cdot 12 + 1 \cdot 16 + 1 \cdot 36$	
$u_{inst,z} = 0.1 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/200.00 = 1.3 \text{ cm}$	Verified
Governing load case: $1 \cdot 9 + 1 \cdot 10 + 1 \cdot 11 + 1 \cdot 13 + 1 \cdot 33$	

Member node displacements

Change

Calc. Note

Parameters

Σχήμα 5-12: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εξωτερικής δοκού HEA180 κατά X για Ο.Κ.Α.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code 5 ext beams X 1,2
Bar: 419 ext beams x_419
Point / Coordinate: 3 / x = 1.00 L = 2.50 m
Load case: 56 ULS20 (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.35+(9+10+11)*1.05+(13+33)*

Section OK

HEA 240

Simplified results Detailed results

FORCES

$N_{,Ed} = 0.00$ kN	$M_{y,Ed} = -186.99$ kN*m	$M_{z,Ed} = 3.47$ kN*m	$V_{y,Ed} = -7.63$ kN
$N_{c,Rd} = 2727.66$ kN	$M_{y,Ed,max} = -186.99$ kN*m	$M_{z,Ed,max} = 3.47$ kN*m	$V_{y,T,Rd} = 1322.72$ kN
$N_{b,Rd} = 2604.04$ kN	$M_{y,c,Rd} = 264.36$ kN*m	$M_{z,c,Rd} = 124.85$ kN*m	$V_{z,Ed} = -186.24$ kN
	$M_{N,y,Rd} = 264.36$ kN*m	$M_{N,z,Rd} = 124.85$ kN*m	$V_{z,T,Rd} = 516.00$ kN
	$M_{b,Rd} = 264.36$ kN*m		$T_{t,Ed} = -0.00$ kN*m
			Class of section = 2

LATERAL BUCKLING

$z = 0.00$ $M_{cr} = 78836.11$ kN*m Curve,LT - b $X_{LT} = 1.00$
 $L_{cr,low} = 0.30$ m $Lam_{LT} = 0.06$ $f_{i,LT} = 0.44$ $X_{LT,mod} = 1.00$

BUCKLING y

$L_y = 2.50$ m $Lam_y = 0.33$
 $L_{cr,y} = 2.50$ m $X_y = 0.95$
 $Lam_y = 24.87$ $k_{yy} = 1.00$

BUCKLING z

$L_z = 2.50$ m $Lam_z = 0.07$
 $L_{cr,z} = 0.30$ m $X_z = 1.00$
 $Lam_z = 5.00$ $k_{yz} = 0.70$

SECTION CHECK

$M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd} = 0.71 < 1.00$ (6.2.9.1.(2))
 $V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.36 < 1.00$ (6.2.6-7)

MEMBER STABILITY CHECK

$Lam_y = 24.87 < Lam_{max} = 210.00$ $Lam_z = 5.00 < Lam_{max} = 210.00$ STABLE
 $N_{,Ed}/(X_y*N_{Rk}/gM1) + k_{yy}*M_{y,Ed,max}/(X_{LT}*M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz}*M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.73 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Σχήμα 5-13: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εξωτερικής δοκού HEA240 κατά X για Ο.Κ.Α.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code 5 ext beams X 1,2
Bar: 528 ext beams x_528

Section OK

HEA 240

Displacements Detailed results

Bar deflection

$u_y = 0.0$ cm $< u_y max = L/200.00 = 1.3$ cm Verified
 Governing load case: 184 SLS47 (1+2+3+4+5+6+7+8+16+36)*1.00

$u_z = 0.1$ cm $< u_z max = L/200.00 = 1.3$ cm Verified
 Governing load case: 156 SLS19 (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11+13+33)*1.00

$u_{inst,y} = 0.0$ cm $< u_{inst,max,y} = L/200.00 = 1.3$ cm Verified
 Governing load case: 1*16 + 1*36

$u_{inst,z} = 0.1$ cm $< u_{inst,max,z} = L/200.00 = 1.3$ cm Verified
 Governing load case: 1*9 + 1*10 + 1*11 + 1*13 + 1*33

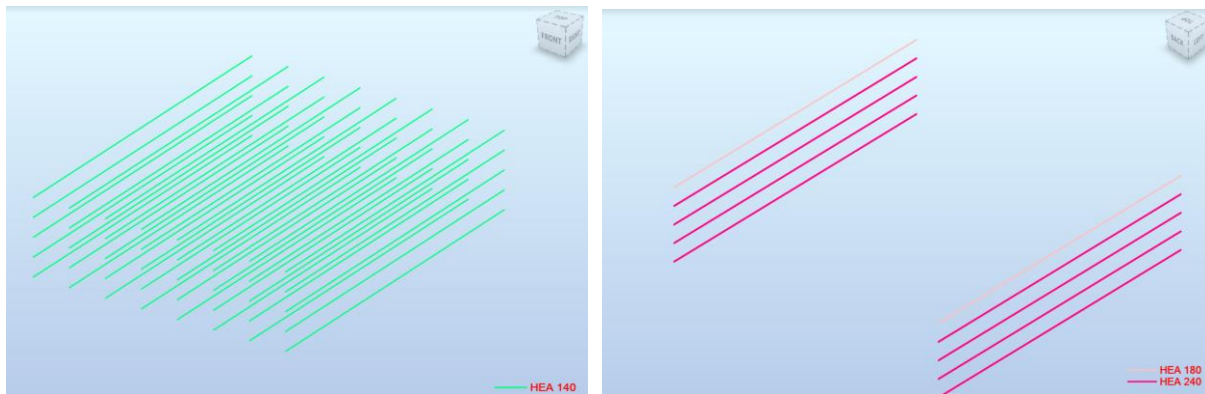
Member node displacements

Σχήμα 5-14: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εξωτερικής δοκού HEA240 κατά X για Ο.Κ.Α.

5.5 Διαστασιολόγηση κύριων δοκών κατά Y

Οι δοκοί κατά τη διεύθυνση Y λαμβάνουν μεταλλική διατομή. Η διαστασιολόγησή τους ακολούθησε την ίδια πορεία με τις δοκούς κατά X και όλες ελέγχθηκαν στους συνδυασμούς φόρτισης Ο.Κ.Α. και Ο.Κ.Λ. Για τις εσωτερικές δοκούς κατά Y επιλέχθηκε διατομή HEA140 και για τις εξωτερικές οι διατομές HEA180 και HEA240, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-15. Επίσης, για όλες τις δοκούς κατά Y θεωρήθηκε ότι δεν

καταπονούνται σε πλευρικό λυγισμό, καθώς εξασφαλίζονται μέσω της σύμμικτης πλάκας. Τέλος, στις εσωτερικές δοκούς κατά Υ τοποθετήθηκαν οι ίδιες ελευθερώσεις όπως αναφέρονται στην παράγραφο 5.4. Στον Πίνακα 5-13 φαίνονται τα ποσοστά εκμετάλλευσης για κάθε διατομή.



(α)

(β)

Σχήμα 5-15: Διαστασιολόγηση των κύριων (α) εσωτερικών και (β) εξωτερικών δοκών κατά Υ

Πίνακας 5-13: Βαθμός εκμετάλλευσης της δυσμενέστερης διατομής για τις δοκούς κατά Υ

Εσωτερικές δοκοί		
Διατομή	Βαθμός εκμετάλλευσης	Κρίσιμος έλεγχος
HEA 140	12 %	Κάμψη και θλίψη
Εξωτερικές δοκοί		
Διατομή	Βαθμός εκμετάλλευσης	Κρίσιμος έλεγχος
HEA 180	47 %	Κάμψη και θλίψη
HEA 240	68 %	Κάμψη

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

HEA 140

Code 2 int beams Y
Bar: 285 int beams y_285
Point / Coordinate: 2 / x = 0.50 L = 4.50 m
Load case: 72 ULS36 (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.35+(9+10+11)*1.05+(15+34)*

Simplified results Detailed results

FORCES

$N_{Ed} = 0.00$ kN $M_{y,Ed} = 3.31$ kN*m
 $N_{c,Rd} = 1115.27$ kN $M_{y,Ed,max} = 3.31$ kN*m
 $N_{b,Rd} = 222.76$ kN $M_{y,c,Rd} = 61.59$ kN*m
 $M_{N,y,Rd} = 61.59$ kN*m
 $M_{b,Rd} = 27.97$ kN*m

Class of section = 1

LATERAL BUCKLING

$z = 0.00$ $M_{cr} = 29.51$ kN*m $\text{Curve}_{LT} = b$ $XLT = 0.45$
 $L_{cr,upp} = 9.00$ m $Lam_{LT} = 1.44$ $f_{i,LT} = 1.46$ $XLT_{mod} = 0.45$

BUCKLING y

$L_y = 9.00$ m $Lam_y = 2.05$
 $L_{cr,y} = 9.00$ m $X_y = 0.20$
 $Lam_y = 156.94$ $k_{yy} = 1.00$

BUCKLING z

$k_{zy} = 1.00$

SECTION CHECK

$M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} = 0.05 < 1.00$ (6.2.5.(1))

MEMBER STABILITY CHECK

$Lam_y = 156.94 < Lam_{y,max} = 210.00$ STABLE
 $N_{Ed}/(X_y * N_{Rk}/gM1) + k_{yy} * M_{y,Ed,max}/(XLT * M_{y,Rk}/gM1) = 0.12 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Σχήμα 5-16: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εσωτερικής δοκού HEA140 κατά Υ για Ο.Κ.Α.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code: 2 int beams Y
Bar: 2451 int beams y_2451

Section OK

HEA 140

Displacements Detailed results

Bar deflection

$u_y = 0.0 \text{ cm} < u_y \text{ max} = L/200.00 = 4.5 \text{ cm}$ Verified
Governing load case: 156 SLS19 (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11+13+33)*1.00

$u_z = 1.0 \text{ cm} < u_z \text{ max} = L/200.00 = 4.5 \text{ cm}$ Verified
Governing load case: 160 SLS23 (1+2+3+4+5+6+7+8+14+33)*1.00

$u_{inst,y} = 0.0 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/200.00 = 4.5 \text{ cm}$ Verified
Governing load case: $0.5*12 + 1*14 + 1*33$

$u_{inst,z} = 0.0 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/200.00 = 4.5 \text{ cm}$ Verified
Governing load case: $0.7*9 + 0.7*10 + 0.7*11 + 1*13 + 1*35$

Member node displacements

OK

Change

Calc. Note

Parameters

Σχήμα 5-17: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εσωτερικής δοκού HEA140 κατά Y για Ο.Κ.Λ.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code: 6 ext beams Y 5
Bar: 2393 ext beams y_2393

Section OK

HEA 180

Point / Coordinate: 1 / x = 0.00 L = 0.00 m
Load case: 74 ULS38 (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.35+(9+10+11)*1.05+12*0.75+

Simplified results Detailed results

FORCES

$N_{,Ed} = 0.00 \text{ kN}$	$M_{y,Ed} = 51.24 \text{ kN*m}$	$M_{z,Ed} = -0.81 \text{ kN*m}$	$V_{y,Ed} = -2.16 \text{ kN}$
$N_{c,Rd} = 1606.42 \text{ kN}$	$M_{y,Ed,max} = 51.24 \text{ kN*m}$	$M_{z,Ed,max} = -0.81 \text{ kN*m}$	$V_{y,c,Rd} = 777.44 \text{ kN}$
$N_{b,Rd} = 1490.62 \text{ kN}$	$M_{y,c,Rd} = 115.33 \text{ kN*m}$	$M_{z,c,Rd} = 55.56 \text{ kN*m}$	$V_{z,Ed} = -43.27 \text{ kN}$
	$M_{N,y,Rd} = 115.33 \text{ kN*m}$	$M_{N,z,Rd} = 55.56 \text{ kN*m}$	$V_{z,c,Rd} = 296.60 \text{ kN}$
	$M_{b,Rd} = 112.41 \text{ kN*m}$		

Class of section = 2

LATERAL BUCKLING

$z = 0.00$ $M_{cr} = 418.76 \text{ kN*m}$ Curve,LT - b $X_{LT} = 0.95$
 $L_{cr,upp} = 2.25 \text{ m}$ $Lam_{LT} = 0.52$ $\phi_{i,LT} = 0.62$ $X_{LT,mod} = 0.97$

BUCKLING y

$L_y = 2.25 \text{ m}$ $Lam_y = 0.40$
 $L_{cr,y} = 2.25 \text{ m}$ $X_y = 0.93$
 $Lam_y = 30.21$ $k_{yy} = 1.00$

BUCKLING z

$k_{yz} = 0.81$

SECTION CHECK

$M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd} = 0.44 < 1.00$ (6.2.9.1.(2))
 $V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.15 < 1.00$ (6.2.6.(1))

MEMBER STABILITY CHECK

$Lam_y = 30.21 < Lam_{max} = 210.00$ STABLE
 $N_{,Ed}/(X_y*N_{Rk}/gM1) + k_{yy}*M_{y,Ed,max}/(X_{LT}*M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz}*M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.47 < 1.00$ (6.3.3.(4))

OK

Change

Forces

Detailed

Calc. Note

Parameters

Help

Σχήμα 5-18: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εξωτερικής δοκού HEA180 κατά Y για Ο.Κ.Α.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code: 6 ext beams Y 5
Bar: 2393 ext beams y_2393

Section OK

HEA 180

Displacements Detailed results

Bar deflection

$u_y = 0.0 \text{ cm} < u_{y \max} = L/200.00 = 1.1 \text{ cm}$ Verified
Governing load case: 156 SLS19 (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11+13+33)*1.00

$u_z = 0.1 \text{ cm} < u_{z \max} = L/200.00 = 1.1 \text{ cm}$ Verified
Governing load case: 152 SLS15

$u_{\text{inst},y} = 0.0 \text{ cm} < u_{\text{inst},\max,y} = L/200.00 = 1.1 \text{ cm}$ Verified
Governing load case: $0.5*12 + 1*13 + 1*33$

$u_{\text{inst},z} = 0.0 \text{ cm} < u_{\text{inst},\max,z} = L/200.00 = 1.1 \text{ cm}$ Verified
Governing load case: $1*9 + 1*10 + 1*11 + 0.5*12 + 0.6*15 + 0.6*34$

Member node displacements

Σχήμα 5-19: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εξωτερικής δοκού HEA180 κατά Y για Ο.Κ.Α.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Code: 7 ext beams Y 1,2,3,4
Bar: 1454 ext beams y_1454
Point / Coordinate: 1 / x = 0.00 L = 0.00 m
Load case: 74 ULS38 (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.35+(9+10+11)*1.05+12*0.75+

Section OK

HEA 240

Simplified results Detailed results

FORCES

$N_{Ed} = -0.00 \text{ kN}$	$M_{y,Ed} = 180.32 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{z,Ed} = -1.62 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$V_{y,Ed} = -4.32 \text{ kN}$
$N_{t,Rd} = 2727.66 \text{ kN}$	$M_{y,pl,Rd} = 264.36 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{z,pl,Rd} = 124.85 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$V_{y,c,Rd} = 1322.72 \text{ kN}$
	$M_{y,c,Rd} = 264.36 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{z,c,Rd} = 124.85 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$V_{z,Ed} = -155.44 \text{ kN}$
	$M_{N,y,Rd} = 264.36 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{N,z,Rd} = 124.85 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$V_{z,c,Rd} = 516.00 \text{ kN}$
	$M_{b,Rd} = 264.36 \text{ kN}\cdot\text{m}$		

Class of section = 2

LATERAL BUCKLING

$z = 0.00$ $M_{cr} = 1550.64 \text{ kN}\cdot\text{m}$ Curve,LT - b XLT = 1.00
 $L_{cr,upp} = 2.25 \text{ m}$ $\lambda_{m,LT} = 0.41$ $f_{i,LT} = 0.57$ XLT,mod = 1.00

BUCKLING y ✘ BUCKLING z ✘

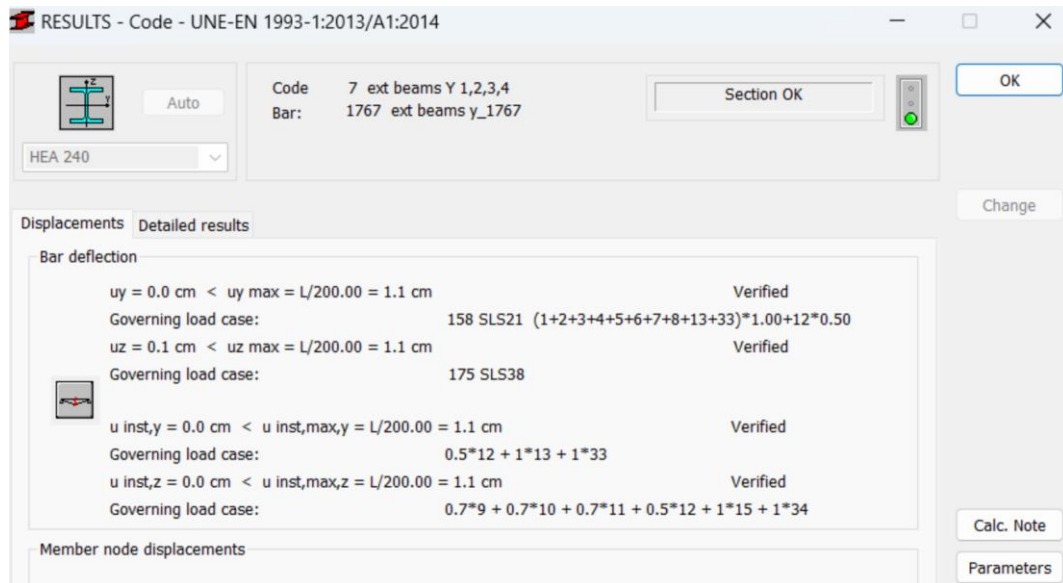
SECTION CHECK

$M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd} = 0.68 < 1.00$ (6.2.9.1.(2))
 $V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.30 < 1.00$ (6.2.6.(1))

MEMBER STABILITY CHECK

$M_{y,Ed}/M_{b,Rd} = 0.68 < 1.00$ (6.3.2.1.(1))

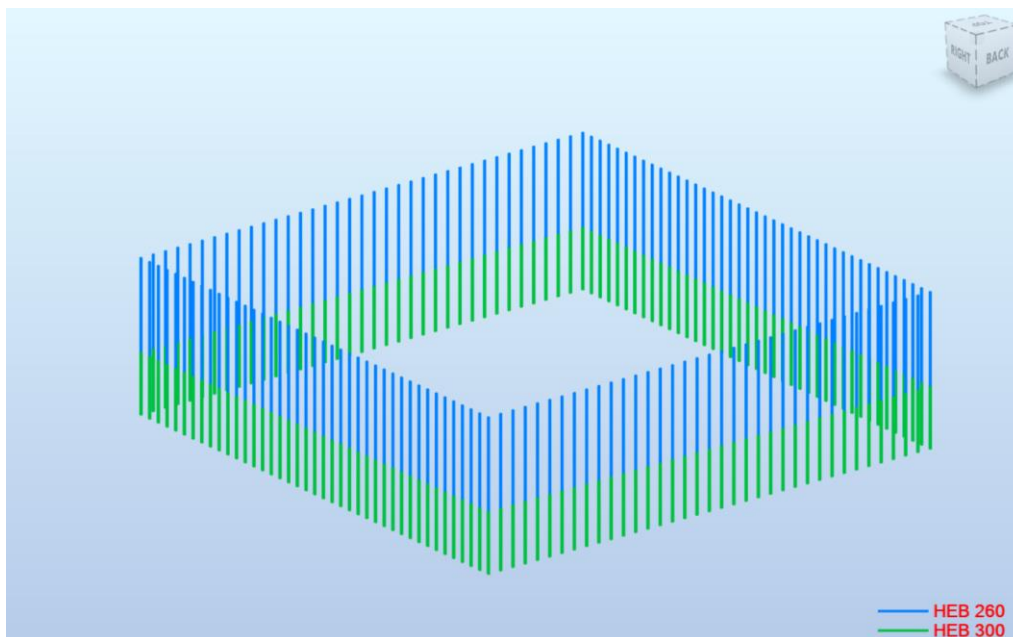
Σχήμα 5-20: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εξωτερικής δοκού HEA240 κατά Y για Ο.Κ.Α.



Σχήμα 5-21: Αποτελέσματα δυσμενέστερης κύριας εξωτερικής δοκού HEA240 κατά Y για Ο.Κ.Λ.

5.6 Διαστασιολόγηση εξωτερικών υποστυλωμάτων

Τα εξωτερικά υποστυλώματα καταπονούνται λόγω αξονικής, τέμνουσας και ροπής. Η διαστασιολόγησή τους έγινε ώστε να επαρκούν έναντι θλίψης, τέμνουσας και κάμψης κατά τους συνδυασμούς Ο.Κ.Α και παράλληλα ελέγχθηκαν τα βέλη τους κατά Ο.Κ.Λ. τα οποία δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή $h/300$. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η ίδια μεταλλική διατομή για τα υποστυλώματα του 1^{ου}-2^{ου} ορόφου HEB300 και ξεχωριστά η ίδια διατομή HEB260 για αυτά του 3^{ου}-4^{ου}-5^{ου} ορόφου. Στον Πίνακα 5-14 δίνεται ο βαθμός εκμετάλλευσης για κάθε διατομή των εξωτερικών υποστυλωμάτων.



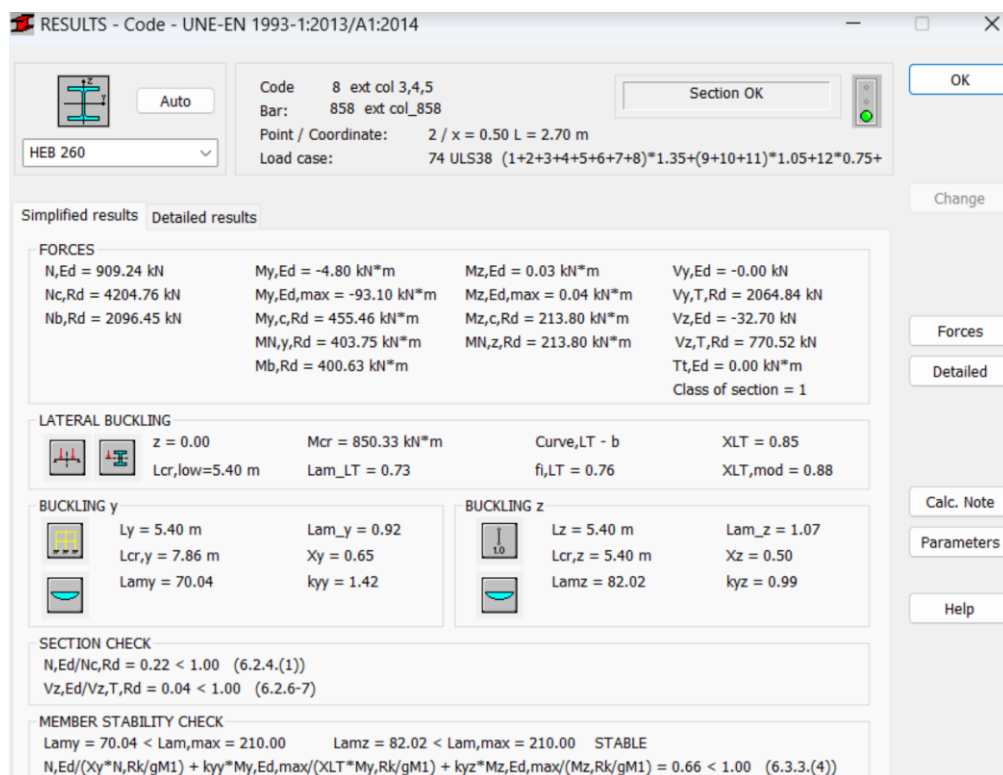
Σχήμα 5-22: Διαστασιολόγηση των εξωτερικών υποστυλωμάτων του κτιρίου

Πίνακας 5-14: Βαθμός εκμετάλλευσης της δυσμενέστερης διατομής για τα εξωτερικά υποστυλώματα

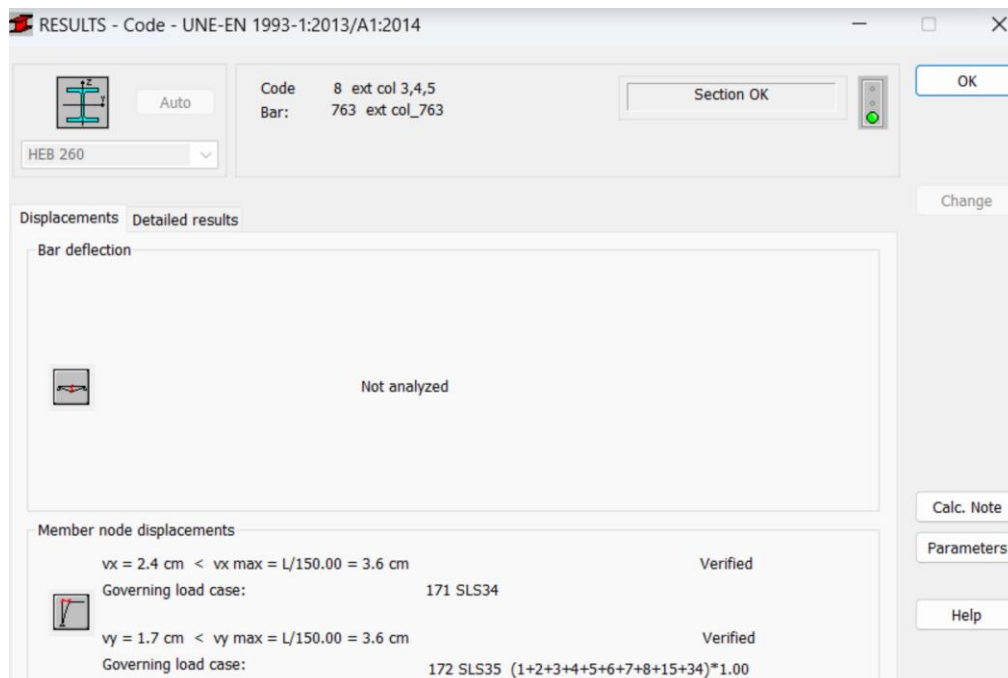
Εξωτερικά υποστυλώματα		
Διατομή	Βαθμός εκμετάλλευσης	Κρίσιμος έλεγχος
HEB 260	66 %	Κάμψη και θλίψη
HEB 300	96 %	Κάμψη και θλίψη

Σχήμα 5-23: Αποτελέσματα δυσμενέστερου εξωτερικού υποστυλώματος HEB300 σε Ο.Κ.Α.

Σχήμα 5-24: Αποτελέσματα δυσμενέστερου εξωτερικού υποστυλώματος HEB300 σε Ο.Κ.Α.



Σχήμα 5-25: Αποτελέσματα δυσμενέστερου εξωτερικού υποστυλώματος HEB260 σε Ο.Κ.Α.

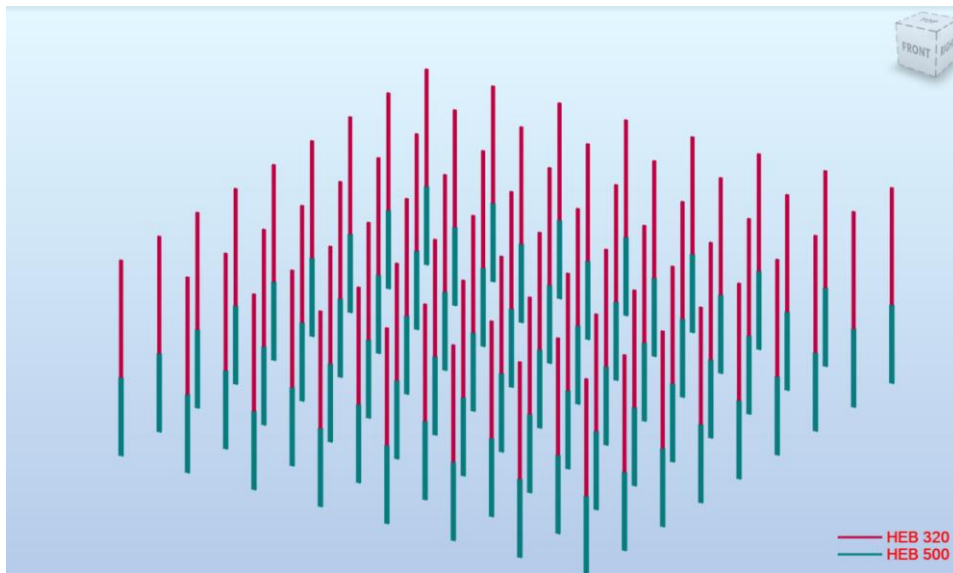


Σχήμα 5-26: Αποτελέσματα δυσμενέστερου εξωτερικού υποστυλώματος HEB260 σε Ο.Κ.Α.

5.7 Διαστασιολόγηση εσωτερικών υποστυλωμάτων

Για τα εσωτερικά υποστυλώματα ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία διαστασιολόγησης, όπως και στα εξωτερικά. Επιλέχθηκαν οι μεταλλικές διατομές HEB500 και HEB320 όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-27.

Ακόμη, έγιναν όλοι οι προβλεπόμενοι έλεγχοι για τους ελέγχους σε Ο.Κ.Α και σε Ο.Κ.Λ. Στον Πίνακα 5-15 φαίνεται ο βαθμός εκμετάλλευσης για κάθε διατομή που έχει επιλεγθεί.



Σχήμα 5-27: Διαστασιολόγηση των εσωτερικών υποστυλωμάτων του κτιρίου

Πίνακας 5-15: Βαθμός εκμετάλλευσης της δυσμενέστερης διατομής για τα εσωτερικά υποστυλώματα

Εσωτερικά υποστυλώματα		
Διατομή	Βαθμός εκμετάλλευσης	Κρίσιμος έλεγχος
HEB 320	98 %	Καμπτικός λυγισμός
HEB 500	86 %	Κάμψη και θλίψη

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1-2013/A1:2014

Code: 11 int col 1,2
Bar: 192 int col_192
Point / Coordinate: 1 / x = 0.00 L = 0.00 m
Load case: 46 ULS10 (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.35+(9+10+11)*1.50+12*0.75

Section OK

HEB 500

Simplified results Detailed results

FORCES
 $N_{Ed} = 5010.41 \text{ kN}$
 $N_{c,Rd} = 8471.65 \text{ kN}$
 $N_{b,Rd} = 5210.80 \text{ kN}$
 $V_{z,Ed} = 0.00 \text{ kN}$
 $V_{z,c,Rd} = 1840.90 \text{ kN}$
 Class of section = 2

LATERAL BUCKLING
 XLT = 1.00

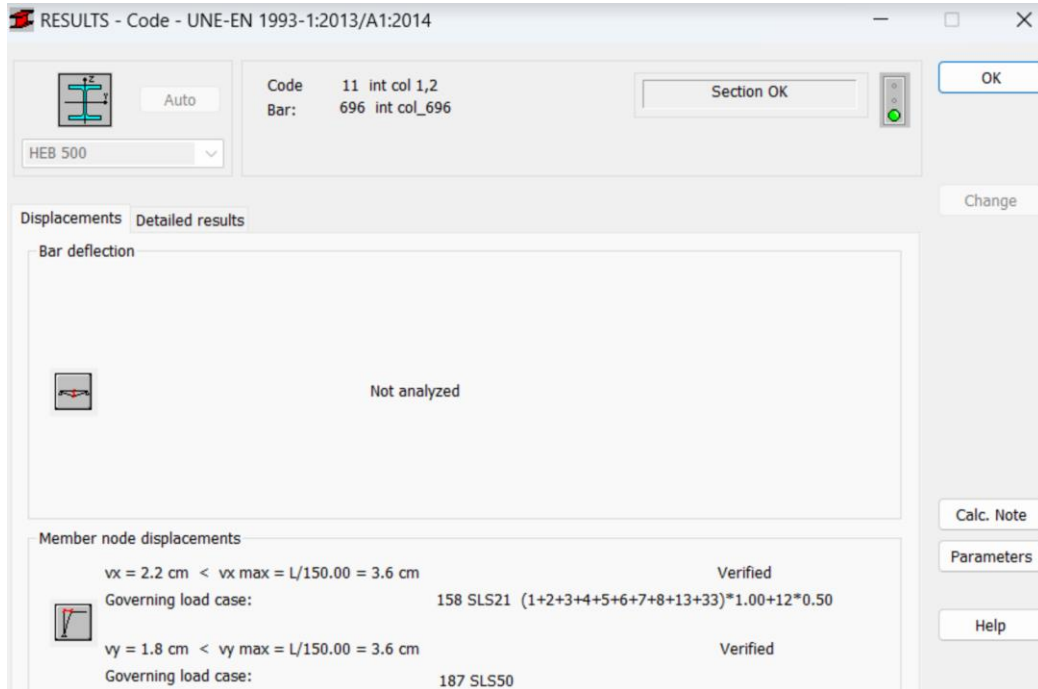
BUCKLING y
 $L_y = 5.40 \text{ m}$ $L_{m,y} = 0.99$
 $L_{cr,y} = 16.01 \text{ m}$ $X_y = 0.67$
 $L_{m,y} = 75.54$

BUCKLING z
 $L_z = 5.40 \text{ m}$ $L_{m,z} = 0.97$
 $L_{cr,z} = 5.40 \text{ m}$ $X_z = 0.62$
 $L_{m,z} = 74.24$

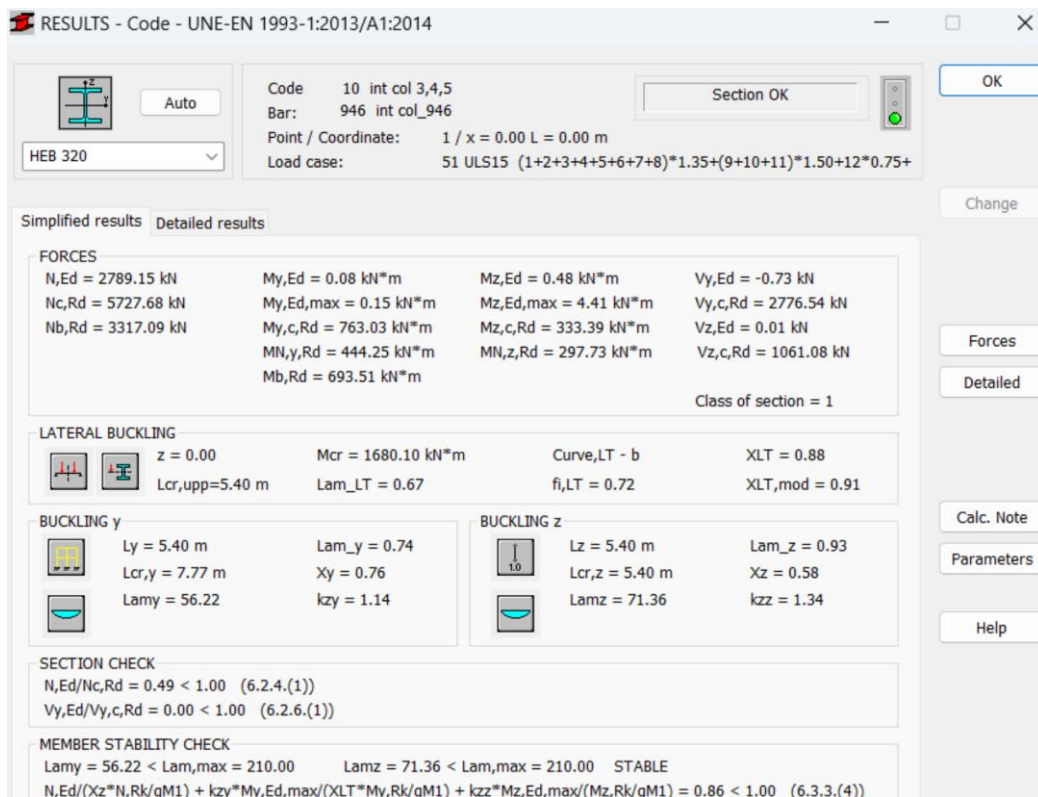
SECTION CHECK
 $N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.59 < 1.00$ (6.2.4.(1))
 $V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.6.(1))

MEMBER STABILITY CHECK
 $L_{m,y} = 75.54 < L_{m,max} = 210.00$ $L_{m,z} = 74.24 < L_{m,max} = 210.00$ STABLE
 $N_{Ed}/\text{Min}(N_{b,Rd}, N_{b,T,Rd}, N_{b,TF,Rd}) = 0.98 < 1.00$ (6.3.1)

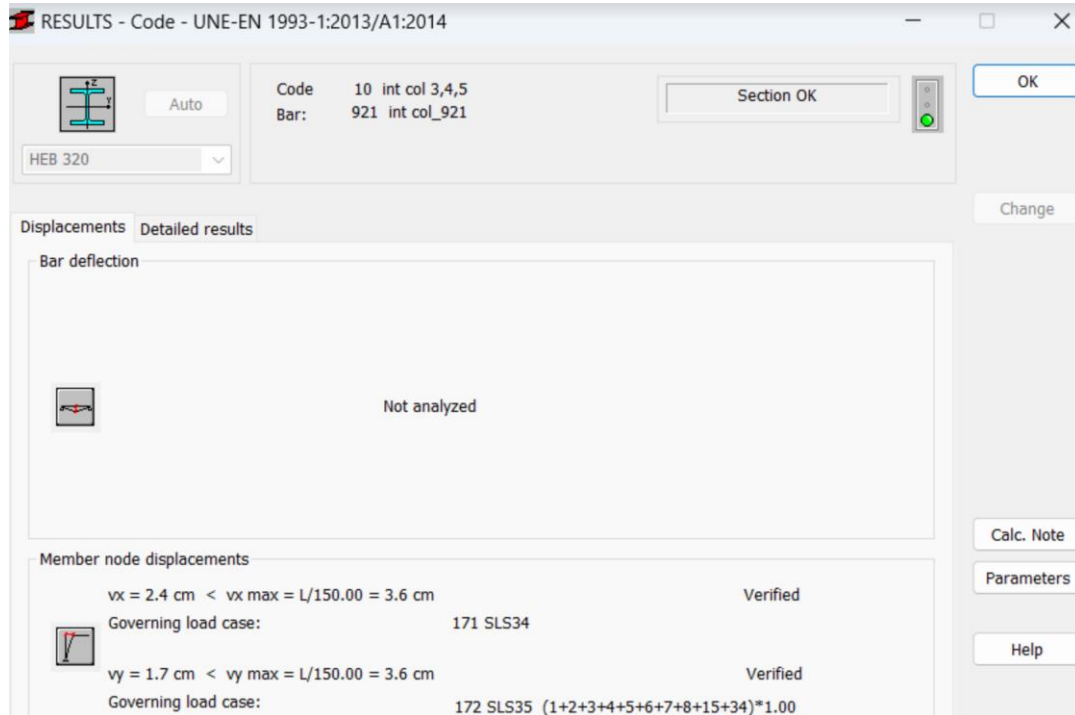
Σχήμα 5-28: Αποτελέσματα δυσμενέστερου εσωτερικού υποστυλώματος HEB500 σε Ο.Κ.Α.



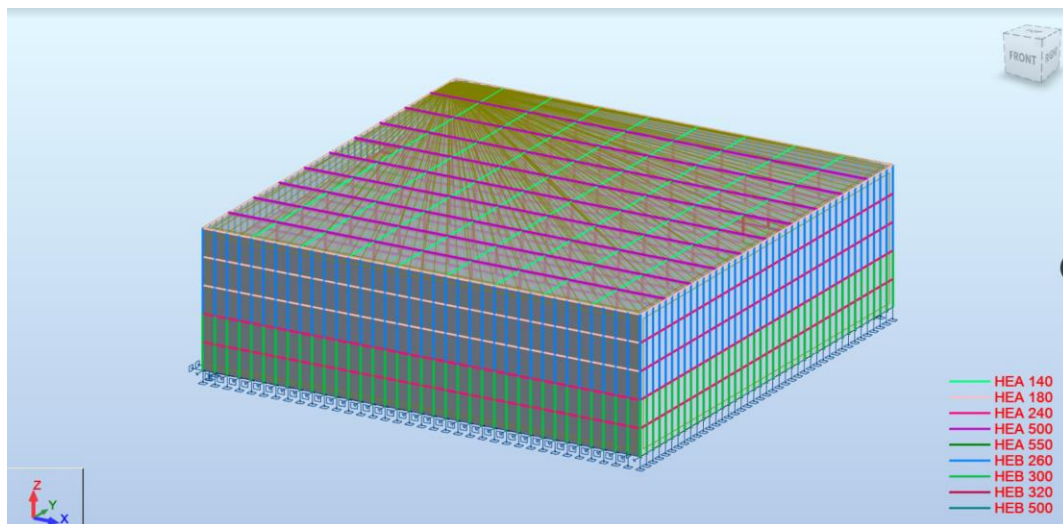
Σχήμα 5-29: Αποτελέσματα δυσμενέστερου εσωτερικού υποστυλώματος HEB500 σε Ο.Κ.Α.



Σχήμα 5-30: Αποτελέσματα δυσμενέστερου εσωτερικού υποστυλώματος HEB320 σε Ο.Κ.Α.



Σχήμα 5-31: Αποτελέσματα δυσμενέστερου εσωτερικού υποστυλώματος HEB320 σε Ο.Κ.Λ.



Σχήμα 5-32: Απεικόνιση όλων των επιλεγμένων διατομών του κτιρίου

Γενικά, επιλέχθηκαν οι ίδιες διατομές για τους πρώτους ορόφους και αντίστοιχα άλλες διατομές για τους ανώτερους ορόφους ώστε να υπάρχει μία ομοιομορφία στην εξωτερική όψη του κτιρίου, αλλά και για να αποφευχθεί η δημιουργία ισχυρών συνδέσεων ροπής, κάτι που πιθανόν να απαιτούσε μεγαλύτερο κόστος.

6 ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

6.1 Γενικά

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός ενός κτιρίου γίνεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 και βασίζεται σε δύο απαιτήσεις: την μη κατάρρευση της κατασκευής και τον περιορισμό βλαβών. Σκοπός είναι ο φορέας να αποκτήσει πλαστική συμπεριφορά και παράλληλα να μην εμφανίσει ψαθυρή μορφή αστοχίας και αυτό εξασφαλίζεται μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού.

6.2 Έλεγχος μελών των πλαισίων ροής

6.2.1 Έλεγχος επιρροής φαινομένων δεύτερης τάξης

Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή ευαισθησίας θ για κάθε όροφο. Ο συντελεστής αυτός προσδιορίζει το ποσοστό επιρροής των φαινομένων δεύτερης τάξης και υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h}, \text{ όπου:} \quad (6-1)$$

P_{tot} : το συνολικό φορτίο βαρύτητας κάθε ορόφου για φόρτιση $G + 0.3Q$

V_{tot} : η συνολική τέμνουσα κάθε ορόφου για σεισμική δράση κατά X ή Y (από το πρόγραμμα Robot)

d_r : οι σχετικές μετακινήσεις για σεισμική φόρτιση κατά X ή Y (είναι ίσες με τις ελαστικές μετακινήσεις πολλαπλασιασμένες επί τον συντελεστή συμπεριφοράς q)

Το κτίριο είναι συμμετρικό, οπότε και για τις δύο διευθύνσεις του σεισμού τα αποτελέσματα είναι ίδια. Επιλέγεται να γίνουν οι έλεγχοι για διεύθυνση σεισμού κατά X. Εφόσον για όλους τους ορόφους, εκτός από τον 5^ο, ισχύει ότι ο συντελεστής $\theta > 0.1$, πρέπει για αυτούς μόνο τους ορόφους να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα δεύτερης τάξης και τα σεισμικά μεγέθη χρειάζεται να προσαυξηθούν κατά $\frac{1}{1-\theta} = 1.25$, όπου $\theta = 0.20$.

Πίνακας 6 1: Υπολογισμός της τιμής του συντελεστή ευαισθησίας για σεισμό κατά X

Όροφος	1	2	3	4	5
P_{tot} [kN]	253795.00	199615.35	146476.65	93594.27	40703.73
V_{tot} [kN]	3457.42	3014.60	2569.43	2053.76	1336.63
d_r [cm]	1.6	1.9	2.0	1.5	1.0
h [cm]	540	540	540	540	540
θ	0.20	0.20	0.20	0.13	0.06

6.2.2 Έλεγχος δοκών

Το σύνολο των δοκών καταπονείται σε τέμνουσα V_{Ed} και σε ροπή M_{Ed} λόγω σεισμικών δράσεων και των κατακόρυφων φορτίων $G + 0.3Q$. Ωστόσο, δεν καταπονούνται σε αξονική δύναμη N_{Ed} καθώς έχει εξασφαλιστεί διαφραγματική λειτουργία.

Σε επίπεδο διατομής γίνονται οι έλεγχοι έναντι κάμψης και τέμνουσας για τους σεισμικούς συνδυασμούς: $G + 0.3Q \pm E_x \pm 0.3E_y$. Σε επίπεδο μέλους γίνεται ο έλεγχος έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού.

UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014 - Member Verification (ULS)

Results Messages

Member	Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case
225 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.15	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
226 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.11	130 G+0.3Q+E _x +0.3E _y
227 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
228 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
229 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
230 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
231 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
232 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
233 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
234 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
235 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
236 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
237 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
238 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
239 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
240 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
241 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
242 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
243 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
244 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.24	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
245 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.24	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
246 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
247 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
248 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.24	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
249 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.24	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
250 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
251 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
252 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
253 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
254 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
255 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
256 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
257 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
258 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
259 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
260 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
261 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.23	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y
262 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.12	105 G+0.3Q-E _x +0.3E _y
263 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.11	130 G+0.3Q+E _x +0.3E _y
264 ext beams y	HEA 240	S 355	22.38	37.48	0.15	106 G+0.3Q-E _x -0.3E _y

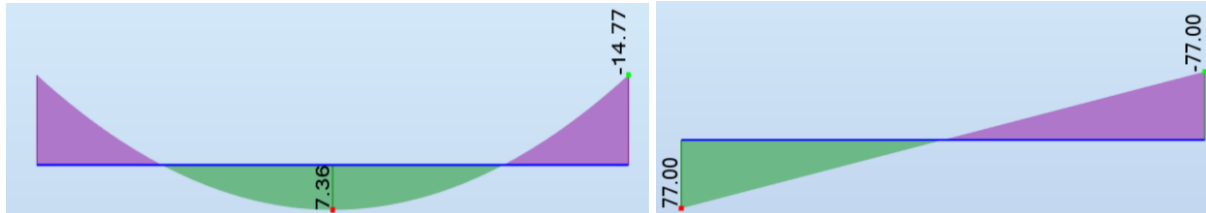
Σχήμα 6-1: Έλεγχοι όλων των δοκών από το Robot για τους σεισμικούς συνδυασμούς $G + 0.3Q \pm E_x \pm 0.3E_y$

Για τον ικανοτικό σχεδιασμό των δοκών θεωρείται ότι έχει σχηματιστεί πλαστική άρθρωση σε ένα από τα δύο άκρα της. Αυτό εξασφαλίζεται με την προσαύξηση των σεισμικών δράσεων, ώστε η τιμή της ροπής λόγω του συνδυασμού των σεισμικών δράσεων και των κατακόρυφων φορτίων $G + 0.3 Q$ να είναι ίση με την πλαστική ροπή αντοχής $M_{pl,Rd}$ της δοκού στα άκρα της. Προκειμένου η δοκός να έχει υψηλή αντοχή και στρεπτική ικανότητα στα άκρα της, πρέπει να έχει διατομή κατηγορίας 1 ή 2.

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

Πρέπει να ελεγχθούν όλοι οι δοκοί των πλαισίων ροής σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Στην μελέτη αυτή θα γίνει αρχικά ο έλεγχος μιας δοκού εξωτερικού πλαισίου με διατομή HEA240, η οποία σύμφωνα με το πρόγραμμα είναι κατηγορίας 1. Ο έλεγχος γίνεται για διάγραμμα ροής το οποίο προκύπτει από επαλληλία των διαγραμμάτων:

$$M_{Ed} = M_{Ed,G+0.3Q} + a M_{Ed,Ex} \tag{6-2}$$



Σχήμα 6-2: Διαγράμματα ροών λόγω (α) των κατακόρυφων φορτίων G+0.3Q και (β) της σεισμικής δράσης Ex

Για να σχηματιστεί πλαστική άρθρωση στο άκρο A της δοκού, το οποίο έχει το δυσμενέστερο διάγραμμα για την επαλληλία των ροών, πρέπει να γίνει προσαύξηση των σεισμικών δράσεων κατά 213 %.

$$M_{Ed,A} = M_{Ed,G+0.3Q} + 2.13 M_{ed,Ex} = M_{pl,Rd} = 179 \text{ kNm} \tag{6-3}$$

Ο έλεγχος έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού και έναντι τέμνουσας της δοκού ικανοποιείται σύμφωνα με το πρόγραμμα Robot.

6.2.3 Έλεγχος κόμβων

Οι κόμβοι των πλαισίων σχεδιάζονται ικανοτικά, ώστε ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων να εμφανιστεί στα άκρα των δοκών και όχι στα υποστυλώματα. Πρέπει, δηλαδή, η πλαστική ροπή αντοχής των υποστυλωμάτων που συντρέχουν σε κάθε κόμβο, λαμβάνοντας υπόψη και την υπεραντοχή, να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αντοχή που έχουν οι συντρέχουσες δοκοί. Εκτός από τη βάση και την κορυφή των υποστυλωμάτων όπου μπορούν να αναπτυχθούν πλαστικές αρθρώσεις, σε όλους τους υπόλοιπους κόμβους πρέπει να ικανοποιείται η εξής ανίσωση: $\Sigma M_{Rc} \geq 1.3 \Sigma M_{Rb}$

Τα υποστυλώματα δέχονται και αξονική δύναμη, οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η απομειωμένη ροπή αντοχής τους $M_{N,y,Rd}$, η οποία υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης. Ο έλεγχος πραγματοποιείται για τους κόμβους του 1^{ου} ορόφου ως δυσμενέστερων.

Ακραίος κόμβος εξωτερικού πλαισίου (υποσύλωμα HEB260 – δοκός HEA240):

$$\Sigma M_{Rc} = 2 \cdot 663.42 = 1326.84 \text{ kNm} \geq 1.3 \Sigma M_{Rb} = 1.3 \cdot 264.36 = 343.67 \text{ kNm} \tag{6-4}$$

Ενδιάμεσος κόμβος εξωτερικού πλαισίου (υποσύλωμα HEB260 – δοκός HEA240):

$$\Sigma M_{Rc} = 2 \cdot 663.42 = 910.92 \text{ kNm} \geq 1.3 \Sigma M_{Rb} = 1.3 \cdot 264.36 = 343.67 \text{ kNm} \tag{6-5}$$

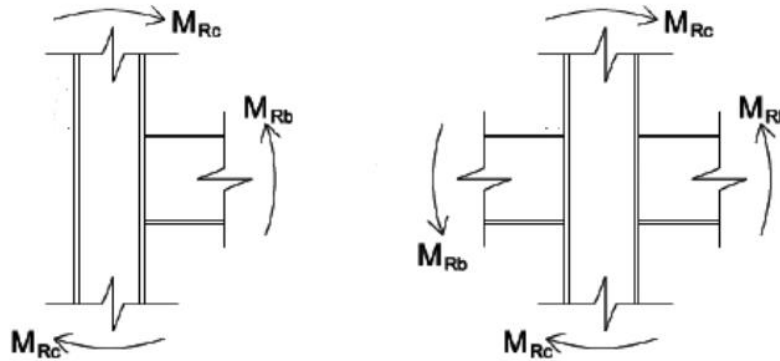
Ακραίος κόμβος εσωτερικού πλαισίου (υποσύλωμα HEB300 – δοκός HEA500):

$$\Sigma M_{Rc} = 2 \cdot 1984.75 = 3969.50 \text{ kNm} \geq 1.3 \Sigma M_{Rb} = 1.3 \cdot 1401.92 = 1822.50 \text{ kNm} \tag{6-6}$$

Ενδιάμεσος κόμβος εσωτερικού πλαισίου (υποσύλωμα HEB500 – δοκός HEA500):

$$\Sigma M_{Rc} = 2 \cdot 1709.25 = 3418.50 \text{ kNm} \geq 1.3 \Sigma M_{Rb} = 1.3 \cdot 1401.92 = 1822.50 \text{ kNm} \tag{6-7}$$

Άρα όλοι οι έλεγχοι των κόμβων ικανοποιούνται.



Σχήμα 6-3: Σχηματική απεικόνιση ακραίου και ενδιάμεσου κόμβου με τις φορές των ροπών αντοχής για τις δοκούς και τα υποστυλώματα

6.2.4 Έλεγχος υποστυλωμάτων

Τα υποστυλώματα των ορόφων, με εξαίρεση τον 1^ο όροφο, ελέγχονται ικανοτικά για προσαυξημένα σεισμικά μεγέθη κατά: $1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega_{min}$, όπου $\gamma_{ov} = 1.25$. Έτσι, ο έλεγχος γίνεται για τους συνδυασμούς φόρτισης: $G + 0.3 \cdot Q \pm 1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega_{min} \cdot E_x \pm 0.3 \cdot E_y$.

Όλα τα υποστυλώματα καταπονούνται σε αξονική, κάμψη και τέμνουσα και οι έλεγχοι γίνονται από το πρόγραμμα σε επίπεδο διατομής και μέλους. Για τον ικανοτικό σχεδιασμό των υποστυλωμάτων υπολογίζεται η ελάχιστη υπεραντοχή για τον σχεδιασμό πλαστικών αρθρώσεων. Η μέγιστη δρώσα ροπή για τους σεισμικούς συνδυασμούς $G + 0.3 \cdot Q \pm E_x \pm 0.3 \cdot E_y$, είναι ίση με: $M_{Ed,max} = 931.69 \text{ kNm}$ και η πλαστική ροπή αντοχής για διατομή HEA500 είναι: $M_{pl,Rd} = 948 \text{ kNm}$. Άρα η ελάχιστη τιμή υπεραντοχής είναι ίση με: $\Omega_{min} = 1.02$. Παρακάτω παρουσιάζονται οι έλεγχοι των υποστυλωμάτων για τους ικανοτικούς συνδυασμούς με τον βαθμό εκμετάλλευσής τους.

The screenshot shows the 'RESULTS' window for Code UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014. The section is HEB 260. The load case is $132 G + 0.3Q + 1.02 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega_{min} \cdot E_x + 0.3E_y (1+2+3+4+5+6+7+8) \cdot 1.0$. The results are as follows:

FORCES			
$N_{Ed} = 566.81 \text{ kN}$	$M_{y,Ed} = -23.05 \text{ kN}^*\text{m}$	$M_{z,Ed} = 7.09 \text{ kN}^*\text{m}$	$V_{y,Ed} = 1.47 \text{ kN}$
$N_{c,Rd} = 4204.76 \text{ kN}$	$M_{y,Ed,max} = -24.20 \text{ kN}^*\text{m}$	$M_{z,Ed,max} = 7.09 \text{ kN}^*\text{m}$	$V_{y,T,Rd} = 2064.84 \text{ kN}$
$N_{b,Rd} = 2096.45 \text{ kN}$	$M_{y,c,Rd} = 455.46 \text{ kN}^*\text{m}$	$M_{z,c,Rd} = 213.80 \text{ kN}^*\text{m}$	$V_{z,Ed} = 8.74 \text{ kN}$
	$MN_{y,Rd} = 445.70 \text{ kN}^*\text{m}$	$MN_{z,Rd} = 213.80 \text{ kN}^*\text{m}$	$V_{z,T,Rd} = 770.52 \text{ kN}$
	$Mb,Rd = 400.63 \text{ kN}^*\text{m}$		$T_{t,Ed} = 0.00 \text{ kN}^*\text{m}$
			Class of section = 1

LATERAL BUCKLING			
$z = 0.00$	$M_{cr} = 850.33 \text{ kN}^*\text{m}$	Curve,LT - b	$XLT = 0.85$
$L_{cr,low} = 5.40 \text{ m}$	$Lam_{LT} = 0.73$	$f_{i,LT} = 0.76$	$XLT,mod = 0.88$

BUCKLING y		BUCKLING z	
$L_y = 5.40 \text{ m}$	$Lam_y = 0.92$	$L_z = 5.40 \text{ m}$	$Lam_z = 1.07$
$L_{cr,y} = 7.86 \text{ m}$	$X_y = 0.65$	$L_{cr,z} = 5.40 \text{ m}$	$X_z = 0.50$
$Lam_y = 70.04$	$kzy = 0.68$	$Lam_z = 82.02$	$kzz = 1.12$

SECTION CHECK

$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.13 < 1.00$ (6.2.4.(1))

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00$ (6.2.6-7)

MEMBER STABILITY CHECK

$Lam_y = 70.04 < Lam_{max} = 210.00$ $Lam_z = 82.02 < Lam_{max} = 210.00$ STABLE

$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + kzy \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + kzz \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.35 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Σχήμα 6-4: Αποτελέσματα ελέγχου εξωτερικού υποστυλώματος HEB260 για τους ικανοτικούς συνδυασμούς

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Bar: 735 int col_735
 Point / Coordinate: 1 / x = 0.00 L = 0.00 m
 Load case: 132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.0

Section OK

Simplified results Detailed results

FORCES

N _{Ed} = 2191.21 kN	My _{Ed} = -58.61 kN*m	Mz _{Ed} = 2.59 kN*m	Vy _{Ed} = 0.69 kN
N _{c,Rd} = 8471.65 kN	My _{Ed,max} = -58.61 kN*m	Mz _{Ed,max} = 2.85 kN*m	Vy _{T,Rd} = 3732.05 kN
N _{b,Rd} = 5210.80 kN	My _{c,Rd} = 1709.25 kN*m	Mz _{c,Rd} = 458.54 kN*m	Vz _{Ed} = 6.36 kN
	MN _{y,Rd} = 1487.27 kN*m	MN _{z,Rd} = 458.54 kN*m	Vz _{T,Rd} = 1840.90 kN
	Mb _{Rd} = 1520.99 kN*m		Tt _{Ed} = 0.00 kN*m
			Class of section = 2

LATERAL BUCKLING

z = 0.00 Mcr = 3371.13 kN*m Curve_{LT} - b XLT = 0.86
 Lcr,low = 5.40 m Lam_{LT} = 0.71 φ_{i,LT} = 0.74 XLT,mod = 0.89

BUCKLING y

Ly = 5.40 m Lam_y = 0.60
 Lcr,y = 9.67 m Xy = 0.89
 Lamy = 45.62 kzy = 0.75

BUCKLING z

Lz = 5.40 m Lam_z = 0.97
 Lcr,z = 5.40 m Xz = 0.62
 Lamz = 74.24 kzz = 1.20

SECTION CHECK

N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.26 < 1.00 (6.2.4.(1))
 Vz_{Ed}/Vz_{T,Rd} = 0.00 < 1.00 (6.2.6-7)

MEMBER STABILITY CHECK

Lamy = 45.62 < Lam,max = 210.00 Lamz = 74.24 < Lam,max = 210.00 STABLE
 N_{Ed}/(X₂*N_{c,Rd}/gM1) + kzy*My_{Ed,max}/(XLT*My_{c,Rd}/gM1) + kzz*Mz_{Ed,max}/(Mz_{c,Rd}/gM1) = 0.46 < 1.00 (6.3.3.(4))

Σχήμα 6-5: Αποτελέσματα ελέγχου εσωτερικού υποστυλώματος HEB500 για τους ικανοτικούς συνδυασμούς

UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014 - Member Verification (ULS) 538to1433

Results Messages

Member	Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case
739 int col_739	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
740 int col_740	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
741 int col_741	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
742 int col_742	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
743 int col_743	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
744 int col_744	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
745 int col_745	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
746 int col_746	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
747 int col_747	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
748 int col_748	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
749 int col_749	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
750 int col_750	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
751 int col_751	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
752 int col_752	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
753 int col_753	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
754 int col_754	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
755 int col_755	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
756 int col_756	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
757 int col_757	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
758 int col_758	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
759 int col_759	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
760 int col_760	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
761 int col_761	HEB 500	S 355	45.62	74.24	0.46	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
762 ext col_762	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.11	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
763 ext col_763	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.11	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
764 ext col_764	HEB 260	S 355	86.49	82.02	0.31	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
765 ext col_765	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.12	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
766 ext col_766	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.10	135 G+0.3Q-1.02*γov*Ωmin*Ex-0.3Ey
767 ext col_767	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.19	135 G+0.3Q-1.02*γov*Ωmin*Ex-0.3Ey
768 ext col_768	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.35	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
769 ext col_769	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.19	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
770 ext col_770	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.09	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
771 ext col_771	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.19	135 G+0.3Q-1.02*γov*Ωmin*Ex-0.3Ey
772 ext col_772	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.35	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
773 ext col_773	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.19	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
774 ext col_774	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.09	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
775 ext col_775	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.19	135 G+0.3Q-1.02*γov*Ωmin*Ex-0.3Ey
776 ext col_776	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.35	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
777 ext col_777	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.19	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey
778 ext col_778	HEB 260	S 355	70.04	82.02	0.09	132 G+0.3Q+1.02*γov*Ωmin*Ex+0.3Ey

Σχήμα 6-6: Αποτελέσματα ελέγχου επάρκειας υποστυλωμάτων για τους ικανοτικούς συνδυασμούς

Τα υποστυλώματα του 1^{ου} ορόφου ελέγχονται ξεχωριστά για τους σεισμικούς συνδυασμούς με κατάλληλα προσαυξημένα σεισμικά μεγέθη X , προκειμένου να σχηματιστεί πλαστική άρθρωση στη βάση τους: $G + 0.3 \cdot Q \pm k_i \cdot E_x \pm 0.3 \cdot E_y$, με k_i τον συντελεστή αύξησης των σεισμικών μεγεθών για το κάθε υποστύλωμα i . Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Robot, τα υποστυλώματα είναι κατηγορίας 1 οπότε έχουν επαρκή αντοχή και στροφική ικανότητα στη βάση τους. Συγκεκριμένα, για ταυτόχρονη καταπόνηση σε αξονική και κάμψη η ροπή αντοχής τους είναι ίση με:

$$M_{N,y,Rd} = \min\left\{M_{pl,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0.5\alpha}; M_{pl,Rd}\right\} \quad (6-8)$$

$$\text{Όπου: } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \text{ και } \alpha = \min\left\{\frac{(A - 2 \cdot b \cdot t_f)}{A}; 0.5\right\} \quad (6-9)$$

Η κατάλληλη προσαύξηση k_i για τα διάφορα υποστυλώματα i του 1^{ου} ορόφου των σεισμικών μεγεθών X υπολογίζεται εξισώνοντας τη δρώσα ροπή του μέλους με την απομειωμένη ροπή αντοχής του $M_{N,y,Rd}$:

$$M_{G+0.3Q} \pm k_i \cdot M_{Ex} \pm 0.3 \cdot M_{Ey} = M_{N,y,Rd} \quad (6-10)$$

Λόγω της πολυπλοκότητας της εξίσωσης, η εύρεση του συντελεστή k_i υπολογίστηκε για κάθε υποστύλωμα ξεχωριστά μέσω του Excel χρησιμοποιώντας την εντολή: «goal seek». Απλοποιητικά, παρουσιάζονται οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν στο Robot για ένα ακραίο υποστύλωμα διατομής HEB300 και για ένα ενδιάμεσο υποστύλωμα διατομής HEB320.

Υποστύλωμα HEB300

Προκειμένου να αναπτυχθεί η ροπή $M_{N,y,Rd}$ στη βάση του υποστυλώματος αυτού, πρέπει τα σεισμικά μεγέθη κατά X να προσαυξηθούν κατά 335.54%. Ο έλεγχος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-7 για τον δυσμενέστερο συνδυασμό: $G + 0.3 \cdot Q + 3.36 \cdot E_x + 0.3 \cdot E_y$.

RESULTS - Code - UNE-EN 1993-1:2013/A1:2014

Bar: 579 ext col_579

Point / Coordinate: 1 / x = 0.00 L = 0.00 m

Load case: 136 G+0.3Q+3.36Ex+0.3Ey (1+2+3+4+5+6+7+8)*1.00+(9+10+11)

Section OK

HEB 300

Simplified results Detailed results

FORCES

$N_{Ed} = 564.07 \text{ kN}$	$M_{y,Ed} = -20.99 \text{ kN}^*\text{m}$	$M_{z,Ed} = 154.59 \text{ kN}^*\text{m}$	$V_{y,Ed} = 55.59 \text{ kN}$
$N_{c,Rd} = 5292.27 \text{ kN}$	$M_{y,Ed,max} = -28.13 \text{ kN}^*\text{m}$	$M_{z,Ed,max} = 154.59 \text{ kN}^*\text{m}$	$V_{y,T,Rd} = 2586.55 \text{ kN}$
$N_{b,Rd} = 2917.93 \text{ kN}$	$M_{y,c,Rd} = 663.42 \text{ kN}^*\text{m}$	$M_{z,c,Rd} = 308.91 \text{ kN}^*\text{m}$	$V_{z,Ed} = 8.08 \text{ kN}$
	$M_{N,y,Rd} = 663.42 \text{ kN}^*\text{m}$	$M_{N,z,Rd} = 308.91 \text{ kN}^*\text{m}$	$V_{z,T,Rd} = 972.08 \text{ kN}$
	$M_{b,Rd} = 602.33 \text{ kN}^*\text{m}$		$T_{t,Ed} = 0.00 \text{ kN}^*\text{m}$
			Class of section = 1

LATERAL BUCKLING

$z = 0.00$	$M_{cr} = 1452.12 \text{ kN}^*\text{m}$	Curve,LT - b	$X_{LT} = 0.88$
$L_{cr,low} = 5.40 \text{ m}$	$Lam_{LT} = 0.68$	$f_{i,LT} = 0.72$	$X_{LT,mod} = 0.91$

BUCKLING y

$L_y = 5.40 \text{ m}$	$Lam_y = 1.07$		
$L_{cr,y} = 10.65 \text{ m}$	$X_y = 0.55$		
$Lam_y = 82.01$	$k_{zy} = 0.67$		

BUCKLING z

$L_z = 5.40 \text{ m}$	$Lam_z = 0.93$		
$L_{cr,z} = 5.40 \text{ m}$	$X_z = 0.58$		
$Lam_z = 71.25$	$k_{zz} = 1.09$		

SECTION CHECK

$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^2.00 + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^1.00 = 0.50 < 1.00$ (6.2.9.1.(6))

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.02 < 1.00$ (6.2.6-7)

MEMBER STABILITY CHECK

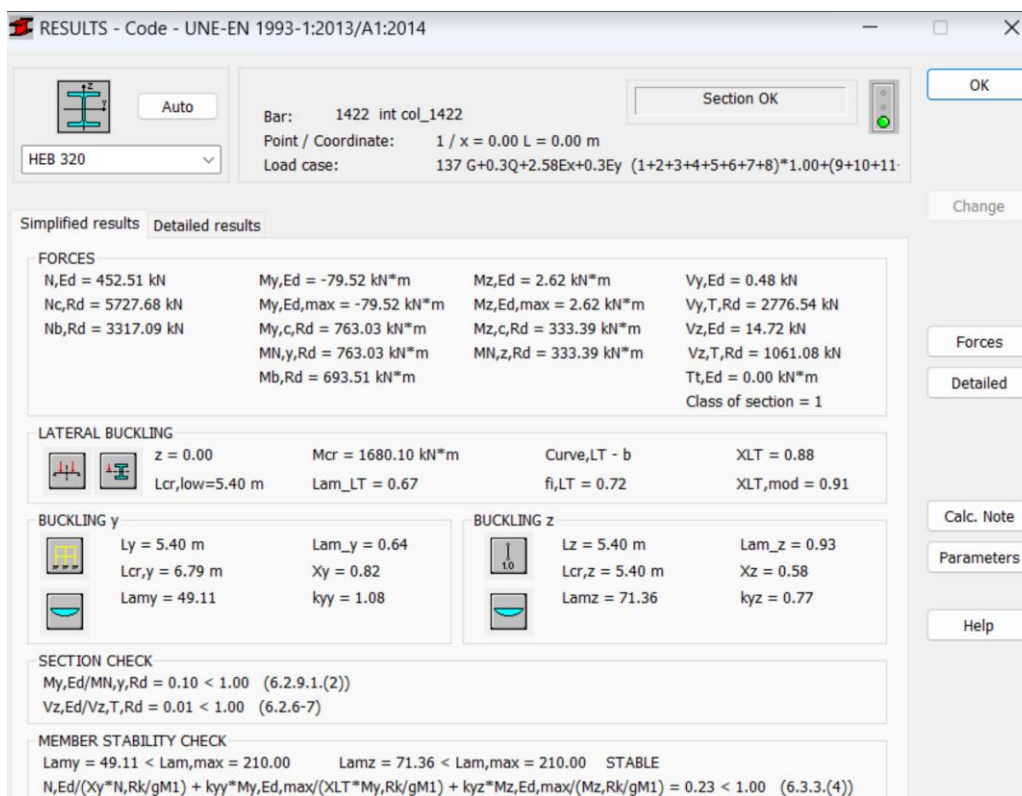
$Lam_y = 82.01 < Lam_{max} = 210.00$ $Lam_z = 71.25 < Lam_{max} = 210.00$ STABLE

$N_{Ed}/(X_z * N_{Rk}/gM1) + k_{zy} * M_{y,Ed,max}/(X_{LT} * M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} * M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.76 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Σχήμα 6-7: Αποτελέσματα ελέγχου εξωτερικού υποστυλώματος 1^{ου} ορόφου HEB300 για τους ικανοτικούς συνδυασμούς

Υποσύλωμα HEB320

Προκειμένου να αναπτυχθεί η ροπή $M_{N,y,Rd}$ στη βάση του υποστυλώματος αυτού, πρέπει τα σεισμικά μεγέθη κατά X να προσαυξηθούν κατά 258%. Ο έλεγχος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-8 για τον δυσμενέστερο συνδυασμό: $G + 0.3 \cdot Q + 2.58 \cdot E_x + 0.3 \cdot E_y$.



Σχήμα 6-8: Αποτελέσματα ελέγχου εσωτερικού υποστυλώματος 1^{ου} ορόφου HEB320 για τους ικανοτικούς συνδυασμούς

6.2.5 Περιορισμός βλαβών

Η απαίτηση περιορισμού βλαβών ικανοποιείται όταν για σχετική μετακίνηση των ορόφων εξαιτίας σεισμού μικρότερο από το σεισμό σχεδιασμού, ο οποίος είναι πιο πιθανόν να συμβεί, ισχύει η σχέση:

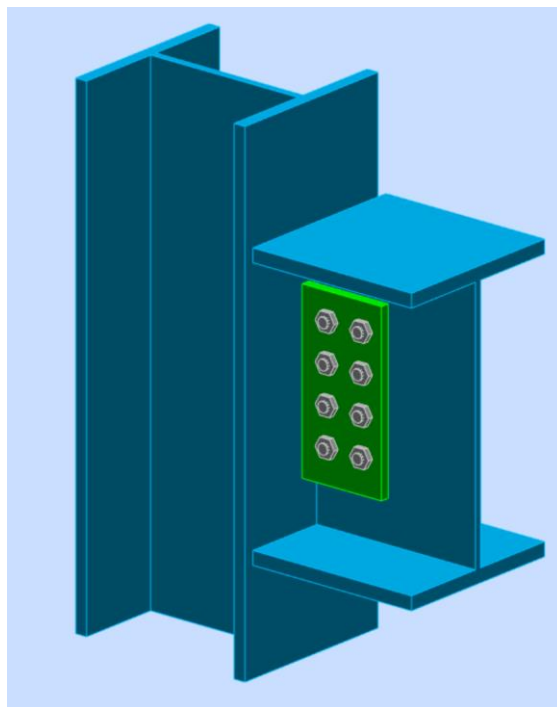
$$d_r \cdot v = 2.0 \cdot 0.5 = 1.0 \text{ cm} \leq 0.0075 \cdot h = 4.05 \text{ cm}, \text{ όπου:} \tag{6-11}$$

d_r : η μέγιστη σχετική μετακίνηση των ορόφων για σεισμό κατά X



v : μειωτικός συντελεστής, για κτίρια κατηγορίας σπουδαιότητας II λαμβάνουμε $v = 0.5$

7 ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

7.1 Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια εσωτερική δοκό κατά Χ

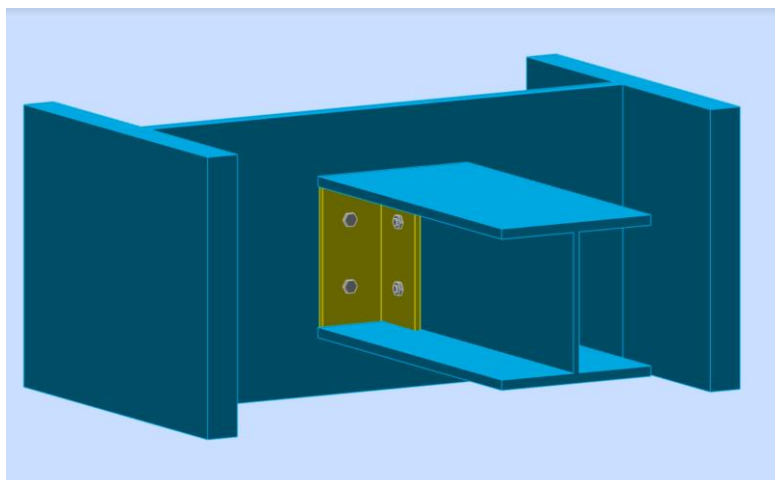


Σχήμα 7-1: Απεικόνιση σύνδεσης υποστυλώματος με κύρια εσωτερική δοκό κατά Χ

	Autodesk	Robot	Structural	Analysis	Professional	2021	
	Calculation of the beam-column (flange) connection						Ratio 0,76
EN 1993-1-8:2005/AC:2009							

Τα αποτελέσματα της επίλυσης της σύνδεσης μέσω του προγράμματος Robot παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β: Αποτελέσματα Επίλυσης Συνδέσεων.

7.2 Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια εσωτερική δοκό κατά Y



Σχήμα 7-2: Απεικόνιση σύνδεσης υποστυλώματος με κύρια εσωτερική δοκό κατά Y

	Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021	
	Calculation of the beam-column (web) connection EN 1993-1-8:2005/AC:2009	

Τα αποτελέσματα της επίλυσης της σύνδεσης μέσω του προγράμματος Robot παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β: Αποτελεσματα Επίλυσης Συνδέσεων.

7.3 Σύνδεση εξωτερικού πλαισίου υποστυλώματος-δοκού

Για τα εξωτερικά πλαίσια, λόγω του μικρού μήκους των δοκών και στις δύο διευθύνσεις, προτείνεται η συγκολλητή σύνδεση των υποστυλωμάτων με τις δοκούς. Επιλέγεται ο δυσμενέστερος κόμβος ενός εξωτερικού πλαισίου (υποστυλώματος ΗΕΒ300, δοκού ΗΕΑ240) και γίνεται ο έλεγχος συγκόλλησής του. Συγκεκριμένα, για την συγκόλληση του άνω και κάτω πέλματος επιλέγεται πάχος $a_f = 5 \text{ mm}$, ενώ για τη συγκόλληση του κορμού επιλέγεται $a_w = 3 \text{ mm}$. Ακολουθούν όλοι οι έλεγχοι του συγκολλητού κόμβου.

Για μία συγκολλητή σύνδεση δοκού-υποστυλώματος πρέπει να ελεγχθούν τα παρακάτω μέρη:

1. Ο κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση
2. Ο κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη
3. Ο κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό
4. Το πέλαμα και ο κορμός δοκού σε θλίψη

Εντατικά μεγέθη κόμβου

$$M_{Ed} = 155000 \text{ kNcm} \quad (7-1)$$

$$V_{Ed} = 122 \text{ kN} \quad (7-2)$$

$$N_{Ed} = 308.65 \text{ kN} \quad (7-3)$$

Η ροπή κάμψης αναλύεται σε ένα ζεύγος δυνάμεων στα πέλαμα της δοκού με μοχλοβραχίονα:

$$z = h_{HEA240} - t_{f,HEA240} = 21.8 \text{ cm} \quad (7-4)$$

$$F_{Ed} = M_{Ed} / z = 15500 \text{ kNm} / 21.8 \text{ cm} = 756.88 \text{ kN} \quad (7-5)$$

Αντοχή σε διάτμηση κορμού υποστυλώματος

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9A_{vc}f_{y,wc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (7-6)$$

Η σχέση ισχύει όταν η λυγηρότητα του κορμού του υποστυλώματος ικανοποιεί την εξής συνθήκη:

$$\frac{d}{t_w} < 69\varepsilon \rightarrow \frac{30.9}{11} = 2.81 < 55.89, \text{ όπου } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.81 \quad (7-7)$$

Άρα ισχύει ότι:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9 \cdot 47.35 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \text{ kN/cm}^2}{\sqrt{3} \cdot 1.0} = 873.43 \text{ kN} > V_{wc,Ed} = 711.01 \text{ kN} \quad (7-8)$$

Αντοχή σε εγκάρσια θλίψη κορμού υποστυλώματος

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \leq \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot \rho \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (7-9)$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2} \cdot a_b + 5 \cdot (t_{fc} + s) = 1.2 + 2\sqrt{2} \cdot 0.5 + 5 \cdot (1.9 + 2.7) = 25.61 \text{ cm} \quad (7-10)$$

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(\frac{b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{A_{vc}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(\frac{25.61 \cdot 1.1}{47.35}\right)^2}} = 0.83 \quad (7-11)$$

$$\lambda_p = 0.932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} \cdot d_{wc} \cdot f_{y,wc}}{E \cdot t_{wc}^2}} = 0.932 \sqrt{\frac{25.61 \cdot 20.8 \cdot 35.5}{21000 \cdot 1.1^2}} = 0.80 > 0.72 \quad (7-12)$$

Μειωτικός συντελεστής για $\lambda_p > 0.72$:

$$\rho = \frac{\lambda_p^{-0.2}}{\lambda_p^2} = 0.94 \quad (7-13)$$

Μέγιστη θλιπτική τάση λόγω αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής στο υποστυλώμα:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{N_{c,Ed}}{A_c} + \frac{M_{c,Ed}}{I_c} \cdot y = \frac{N_{c,Ed}}{A_c} + \frac{M_{c,Ed}}{I_c} \cdot \left(\frac{h_c}{2} - t_{fc} - r_c\right) = 8.48 \text{ kN/cm}^2 \quad (7-14)$$

$$\sigma_{com,Ed} < 0.7f_{y,wc} = 24.85 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow k_{wc} = 1.0 \quad (7-15)$$

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{0.83 \cdot 1.0 \cdot 25.61 \cdot 1.1 \cdot 35.5}{1.0} = 830.06 \text{ kN} > \frac{0.83 \cdot 1.0 \cdot 0.94 \cdot 25.61 \cdot 1.1 \cdot 35.5}{1.0} = 761.45 \text{ kN} \quad (7-16)$$

$$F_{c,wc,Rd} 761.45 \text{ kN} > F_c = 756.88 \text{ kN} \quad (7-17)$$

Η δοκός HEA240 είναι κατηγορίας 2 και έτσι επιτρέπεται ο πλαστικός έλεγχος αυτής.

Έλεγχος απομείωσης αντοχής σε ροπή κάμψης λόγω διατμησης:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 515.27 \text{ kN} \quad (7-18)$$

$$V_{b,Ed} = 122 \text{ kN} < 0.5V_{pl,Rd} = 257.64 \text{ kN} \quad (7-19)$$

Άρα δεν χρειάζεται απομείωση της αντοχής σε ροπή κάμψης λόγω διάτμησης.

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = 17900 \text{ kNcm} \quad (7-20)$$

Έλεγχος επάρκειας κορμού και πέλματος δοκού σε θλίψη

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h-t_{fb}} = \frac{17900}{23-1.2} = 739.67 \text{ kN} > F_{c,Ed} = 711 \text{ kN} \quad (7-21)$$

Αντοχή συγκολλητού κόμβου σε ροπή

$$M_{j,Rd} = z \cdot F_{t,Rd} = (23 - 1.2) \cdot 761.45 = 16599.61 \text{ kNcm} > M_{j,Ed} = 15500 \text{ kNcm} \quad (7-22)$$

Έλεγχος επάρκειας συγκόλλησης

$$I = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot a_w \cdot d_b^3 + 2a_f \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2 + 2a_f \cdot (b - t_{wb} - 2r_b) \cdot \left(\frac{h}{2} - t_{fb}\right)^2 = 5415.56 \text{ cm}^4 \quad (7-23)$$

Τάση στη συγκόλληση κορμού

$$\tau_{II} = \frac{V_{b,Ed}}{2d_b a_w} = \frac{122}{2 \cdot 16.4 \cdot 0.3} = 12.4 \text{ kN/cm}^2 \quad (7-24)$$

Τάση στη συγκόλληση πέλματος

$$\sigma_{\perp,1} = \frac{M_{b,Ed} \cdot d_b}{2I} = \frac{15500 \cdot 16.4}{2 \cdot 5415.50} = 23.47 \text{ kN/cm}^2 \quad (7-25)$$

$$\sigma_{\perp,2} = \frac{M_{b,Ed} \cdot h_b}{2I} = \frac{15500 \cdot 23}{2 \cdot 5415.50} = 32.91 \text{ kN/cm}^2 \quad (7-26)$$

$$\sigma_{\max} = 32.91 \text{ kN/cm}^2 < \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{49}{1.25} = 39.2 \text{ kN/cm}^2 \quad (7-27)$$

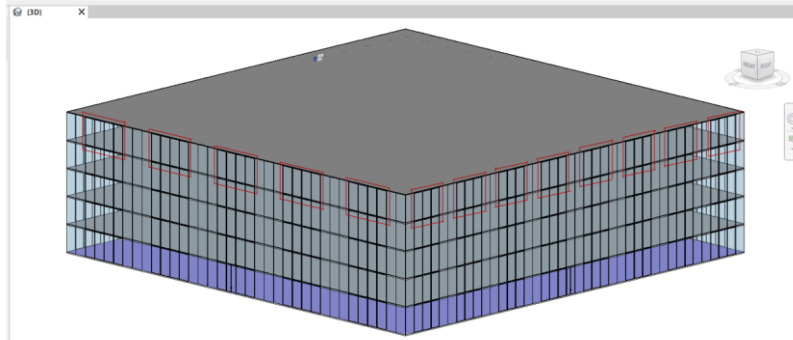
$$\sqrt{(\sigma_L)^2 + (\tau_{II})^2} = 26.54 \text{ kN/cm}^2 < \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 28.29 \text{ kN/cm}^2 \quad (7-28)$$

8 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το πρόγραμμα Revit της εταιρείας Autodesk επιτρέπει τον αναλυτικό προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης μιας κατασκευής. Αυτή η λειτουργία είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς μας επιτρέπει να ερευνήσουμε αν το κτίριο που πρόκειται να κατασκευαστεί είναι φιλικό ως προς το περιβάλλον και επιπλέον αν πληροί τις απαιτήσεις που ορίζουν οι Κανονισμοί για την κατανάλωση ενέργειας. Σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται οι προδιαγραφές αυτές μπορούμε να αλλάξουμε το σχεδιασμό του κτιρίου και συγκεκριμένα τα υλικά, τους εγκατεστημένους μηχανισμούς και τον γενικότερο εξοπλισμό του, προκειμένου να μην ξοδεύεται ενέργεια στις περιπτώσεις που δεν χρειάζεται αλλά αντιθέτως να αξιοποιείται διαφορετικά.

Για να προσδιορίσουμε την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου γραφείων, σχεδιάζουμε στο Revit ένα ξεχωριστό αρχιτεκτονικό μοντέλο. Είναι σημαντικό να προσομοιωθεί το κτίριο ως μία μάζα μέσω της εντολής *Massing & Site In-Place Mass*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-4. Έπειτα, σχηματίζονται οι 5 όροφοι της μάζας και σε κάθε πλευρά κατασκευάζονται περιμετρικοί τοίχοι *Curtain Walls*, οι οποίοι προσομοιώνουν την κάλυψη του κτιρίου με τους υαλοπίνακες. Κάθε όροφος καλύπτεται με δάπεδο από 160 mm σκυρόδεμα και 50 mm μεταλλικό κατάστρωμα, πλάκα οροφής και ο ανώτερος όροφος με οροφή. Τέλος, το κτίριο καλύπτεται εξωτερικά από τα υποστυλώματα και τα δοκάρια των οποίων η μεταλλική διατομή έχει υποστεί θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, δηλαδή καλύπτεται με βαφή.

Για να γίνει σωστά η ενεργειακή ανάλυση πρέπει να προστεθούν το σύνολο των παράθυρων και των θυρών. Στην μπροστινή και πίσω πλευρά του κτιρίου επιλέγονται 5 φατνώματα αποτελούμενα από 4 ανοίγματα το καθένα για κάθε όροφο, και στις πλαϊνές όψεις 8 φατνώματα με 3 ανοίγματα το καθένα αντίστοιχα, όπως δείχνει το Σχήμα 8-1. Τέλος, στο Σχήμα 8-2 φαίνονται οι θύρες που έχουν τοποθετηθεί στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, επιλέγουμε η κύρια κεντρική είσοδο να βρίσκεται στην μπροστινή όψη της κατασκευής και στις υπόλοιπες όψεις τοποθετούνται θύρες σε περίπτωση πυρκαγιάς ή άλλης έκτακτης ανάγκης.

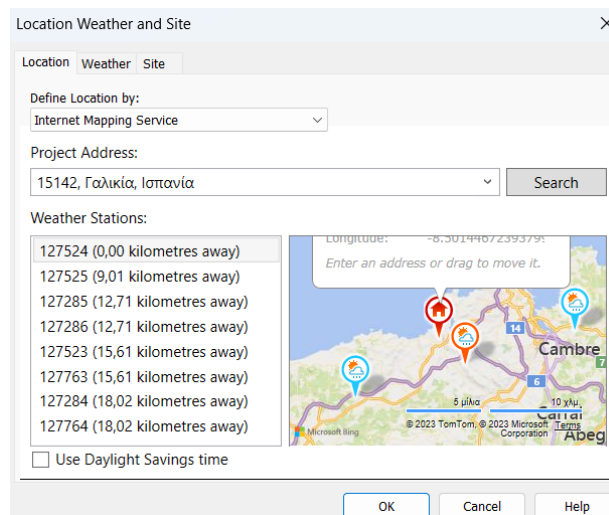


Σχήμα 8-1: Απεικόνιση του τρόπου τοποθέτησης των ανοιγμάτων κατά Χ και Υ



Σχήμα 8-2: Απεικόνιση της τοποθέτησης της εξωτερικής κεντρικής πόρτας του κτιρίου

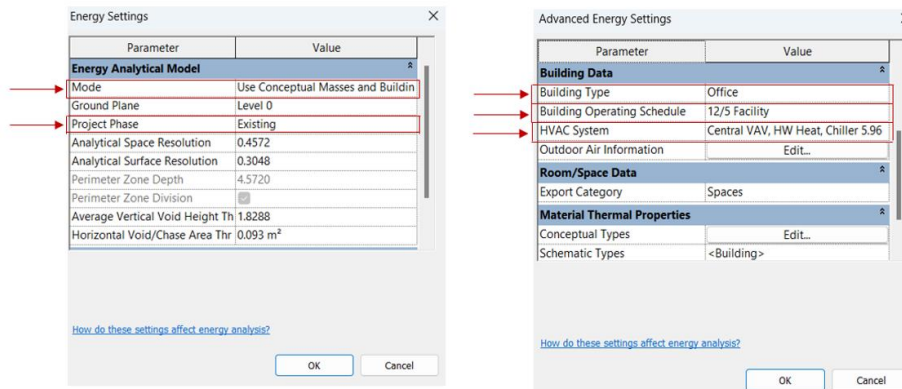
Για να προχωρήσουμε στην ανάλυση του μοντέλου πρέπει να βάλουμε την ακριβή θέση του κτιρίου γραφείων.



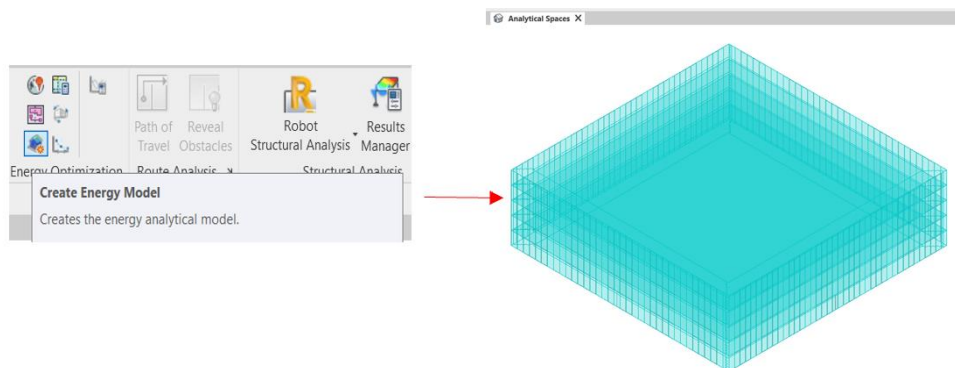
Σχήμα 8-3: Εισαγωγή της ακριβής τοποθεσίας της κατασκευής στο Revit

Ακολούθως, συνεχίζουμε συμπληρώνοντας τα ισχύοντα δεδομένα του κτιρίου: *Energy Settings*. Χρησιμοποιούμε *Conceptual Masses and Building Elements* για την ενεργειακή ανάλυση και εφόσον η κατασκευή που μελετάμε υπάρχει ήδη, στο κουτί *Project Phase* σημειώνουμε *Existing*. Έπειτα, με την επιλογή *Other Options* μπορούμε να ορίσουμε το *Building Type* του κτιρίου: *Office*. Στο πλαίσιο *Building Operating Schedule* προσθέτουμε *12/5 Facility* και όσον αφορά το HVAC System επιλέγουμε *Central*

VAV, HW Heat, Chiller 5.96 COP, Boilers 84.5 eff. Σε κάθε όροφο τοποθετούνται ανιχνευτές αύξησης θερμοκρασίας και καπνού, συναγερμός φωτιάς και ασφαλείας, εξοπλισμός ψύξης, Air Conditioner, μονάδα θέρμανσης, στεγνωτήριο χεριών, σύστημα ηλεκτρικού φωτισμού με διακόπτες κανονικής και έκτακτης χρήσης, αισθητήρες φωτισμού οροφής ημέρας, έξυπνες μονάδες φωτισμού LED, μονάδα εξοικονόμησης ενέργειας, diesel γεννήτρια ρεύματος σε έκτακτη ανάγκη, σύστημα τροφοδοσίας για τις συσκευές φωτισμού, πίνακας μετασχηματισμού ενέργειας και sprinklers ανά 6 m.

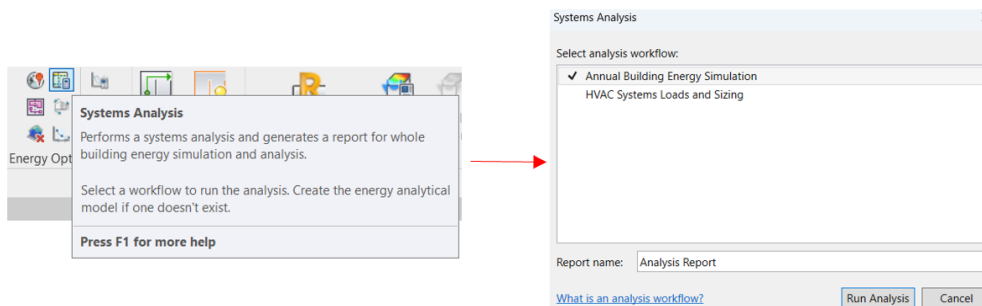


Σχήμα 8-4: Εισαγωγή των δεδομένων ενεργειακής ανάλυσης στο Revit



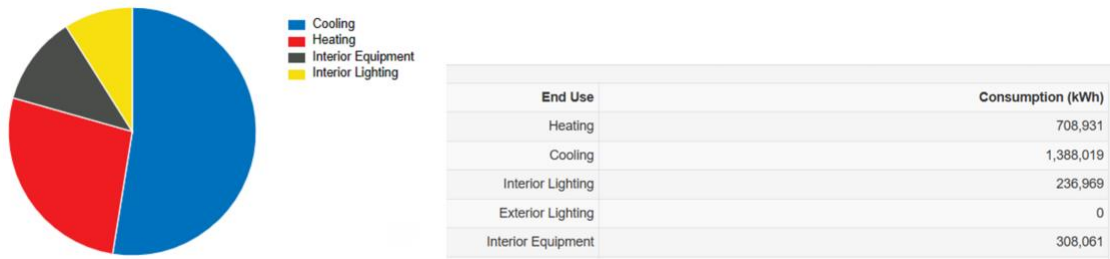
Σχήμα 8-5: Δημιουργία ενεργειακού μοντέλου στο περιβάλλον του Revit

Μέσω της εντολής που φαίνεται στο , μπορούμε να δημιουργήσουμε το ενεργειακό μοντέλο του κτιρίου. Ακολούθως, αφού έχουμε δημιουργήσει το ενεργειακό μοντέλο, μπορούμε μέσω της εντολής που φαίνεται στην Εικόνα να δούμε αναλυτικά την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

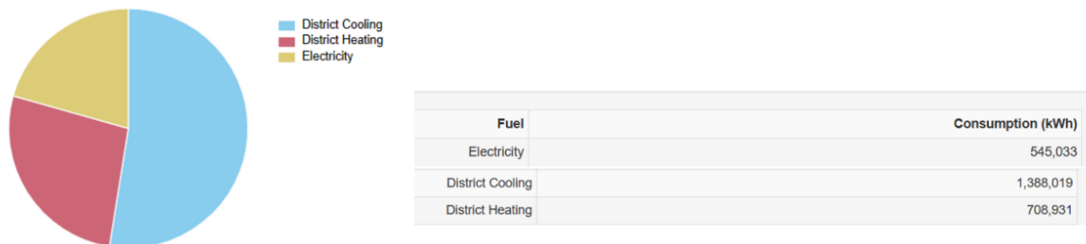


Σχήμα 8-6: Εντολή για τον αναλυτικό υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου

Τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα που προκύπτουν από την ενεργειακή ανάλυση εμφανίζονται παρακάτω.



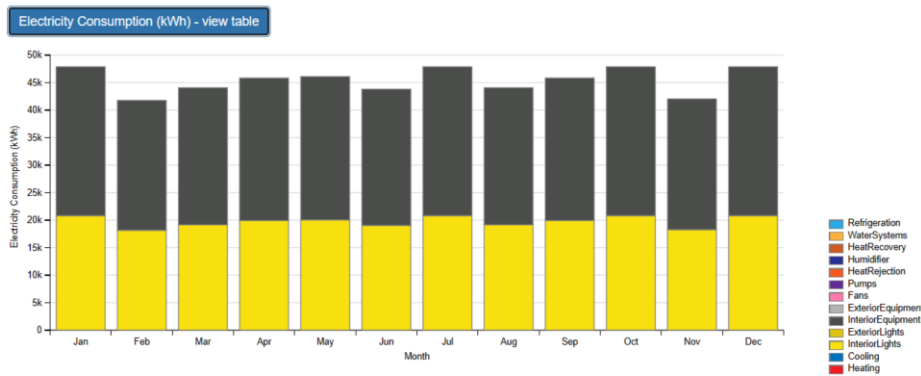
Σχήμα 8-7: Ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου λόγω θέρμανσης, ψύξης και εσωτερικού φωτισμού



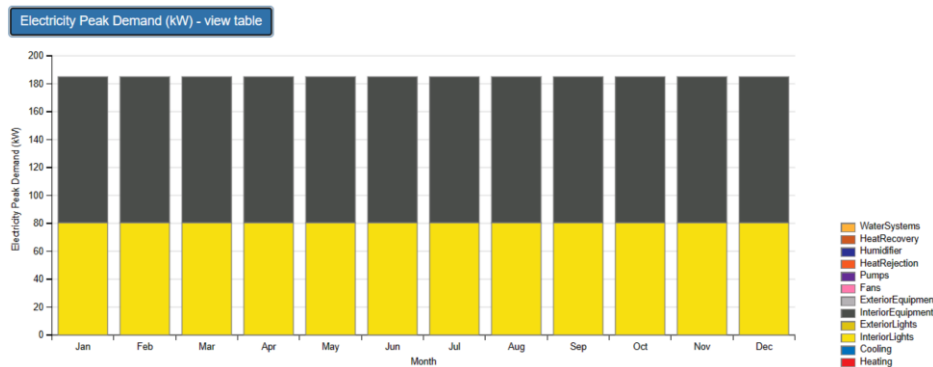
Σχήμα 8-8: Ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου λόγω θέρμανσης, ψύξης και κατανάλωσης ηλεκτρισμού

Σύμφωνα με το Σχήμα 8-9, η μέγιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας παρατηρείται τον μήνα Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Ιούλιο, κάτι που φαίνεται λογικό καθώς αυτοί είναι οι πιο κρύοι και ζεστοί αντίστοιχα μήνες του χρόνου. Κατά συνέπεια, υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη θέρμανσης και κλιματισμού.

Monthly Overview



Σχήμα 8-9: Διάγραμμα μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 8-10: Διάγραμμα μέγιστης μηνιαίας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Πίνακας 8-1: Συνολική ενεργειακή κατανάλωση κτιρίου ανά επιφάνεια

Site and Source Energy

	Total Energy [GJ]	Energy Per Total Building Area [MJ/m ²]	Energy Per Conditioned Building Area [MJ/m ²]
Total Site Energy	9511.14	1145.51	1145.51
Net Site Energy	9511.14	1145.51	1145.51
Total Source Energy	20710.81	2494.39	2494.39
Net Source Energy	20710.81	2494.39	2494.39

Πίνακας 8-2: Ενεργειακή κατανάλωση ηλεκτρισμού, θέρμανσης και ψύξης ανά επιφάνεια

Utility Use Per Total Floor Area

	Electricity Intensity [MJ/m ²]	Natural Gas Intensity [MJ/m ²]	Additional Fuel Intensity [MJ/m ²]	District Cooling Intensity [MJ/m ²]	District Heating Intensity [MJ/m ²]	Water Intensity [m ³ /m ²]
Lighting	102.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	0.00	0.00	0.00	601.82	307.38	0.00
Other	133.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	236.32	0.00	0.00	601.82	307.38	0.00

Πίνακας 8-3: Τιμές μέγιστης και ελάχιστης μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε [J]

	INTERIORLIGHTS:ELECTRICITY [J]	INTERIOREQUIPMENT:ELECTRICITY [J]	HEATING:DISTRICTHEATING [J]	COOLING:DISTRICTCOOLING [J]
January	0.749333E+11	0.974133E+11	0.389046E+12	0.168184E+12
February	0.653776E+11	0.849909E+11	0.359172E+12	0.224106E+12
March	0.689811E+11	0.896755E+11	0.301160E+12	0.330530E+12
April	0.717481E+11	0.932725E+11	0.210711E+12	0.419441E+12
May	0.721663E+11	0.938163E+11	0.180453E+12	0.471870E+12
June	0.685629E+11	0.891317E+11	0.777142E+11	0.567636E+12
July	0.749333E+11	0.974133E+11	0.408960E+11	0.662623E+12
August	0.689811E+11	0.896755E+11	0.410706E+11	0.688488E+12
September	0.717481E+11	0.932725E+11	0.619856E+11	0.618556E+12
October	0.749333E+11	0.974133E+11	0.144573E+12	0.477776E+12
November	0.657959E+11	0.855347E+11	0.347802E+12	0.191479E+12
December	0.749333E+11	0.974133E+11	0.397561E+12	0.176184E+12
Annual Sum or Average	0.853094E+12	0.110902E+13	0.255215E+13	0.499687E+13
Minimum of Months	0.653776E+11	0.849909E+11	0.408960E+11	0.168184E+12
Maximum of Months	0.749333E+11	0.974133E+11	0.397561E+12	0.688488E+12

Πίνακας 8-4: Τιμές μέγιστης και ελάχιστης μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε [W]

	ELECTRICITY:FACILITY {Maximum}[W]	ELECTRICITY:FACILITY {TIMESTAMP}	INTERIORLIGHTS:ELECTRICITY {AT MAX/MIN} [W]	INTERIOREQUIPMENT:ELECTRICITY {AT MAX/MIN} [W]
January	185000.67	01-JAN-08:15	80435.07	104565.60
February	185000.67	03-FEB-08:15	80435.07	104565.60
March	185000.67	03-MAR-08:15	80435.07	104565.60
April	185000.67	01-APR-08:15	80435.07	104565.60
May	185000.67	01-MAY-08:15	80435.07	104565.60
June	185000.67	02-JUN-08:15	80435.07	104565.60
July	185000.67	01-JUL-08:15	80435.07	104565.60
August	185000.67	01-AUG-08:15	80435.07	104565.60
September	185000.67	01-SEP-08:15	80435.07	104565.60
October	185000.67	01-OCT-08:15	80435.07	104565.60
November	185000.67	03-NOV-08:15	80435.07	104565.60
December	185000.67	01-DEC-08:15	80435.07	104565.60
Annual Sum or Average				
Minimum of Months	185000.67		80435.07	104565.60
Maximum of Months	185000.67		80435.07	104565.60

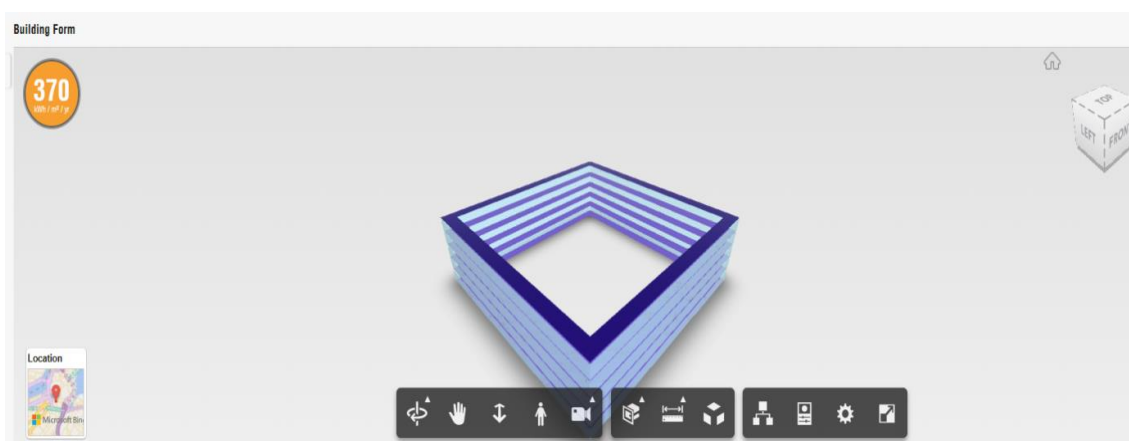
Πίνακας 8-5: Τιμές μέγιστης και ελάχιστης μηνιαίας κατανάλωσης θέρμανσης

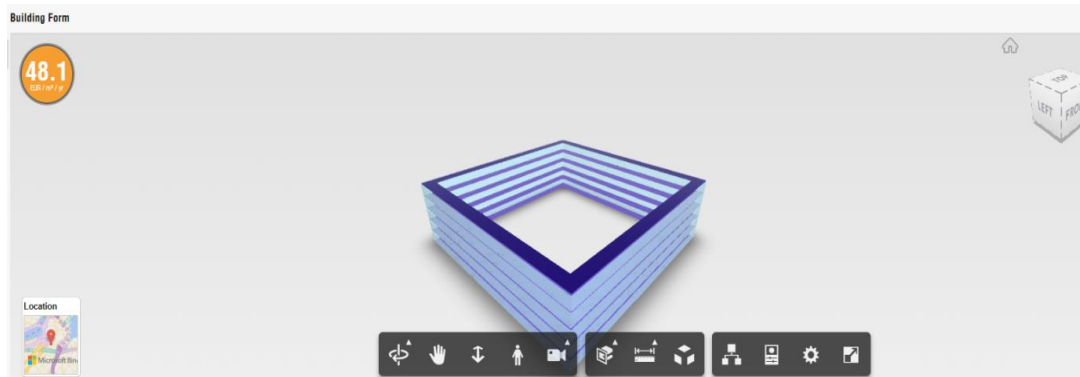
	DISTRICTHEATING:FACILITY {Maximum}[W]	DISTRICTHEATING:FACILITY {TIMESTAMP}	HEATING:DISTRICTHEATING {AT MAX/MIN} [W]
January	724693.28	24-JAN-05:45	724693.28
February	694771.71	16-FEB-05:45	694771.71
March	616451.86	22-MAR-05:45	616451.86
April	594072.85	11-APR-05:45	594072.85
May	576144.19	07-MAY-05:45	576144.19
June	436055.57	04-JUN-05:45	436055.57
July	327020.99	15-JUL-05:45	327020.99
August	362871.21	08-AUG-05:45	362871.21
September	394717.77	10-SEP-05:45	394717.77
October	559207.34	25-OCT-05:45	559207.34
November	616915.46	24-NOV-05:45	616915.46
December	697893.14	25-DEC-05:45	697893.14
Annual Sum or Average			
Minimum of Months	327020.99		327020.99
Maximum of Months	724693.28		724693.28

Πίνακας 8-6: Τιμές μέγιστης και ελάχιστης μηνιαίας κατανάλωσης ψύξης

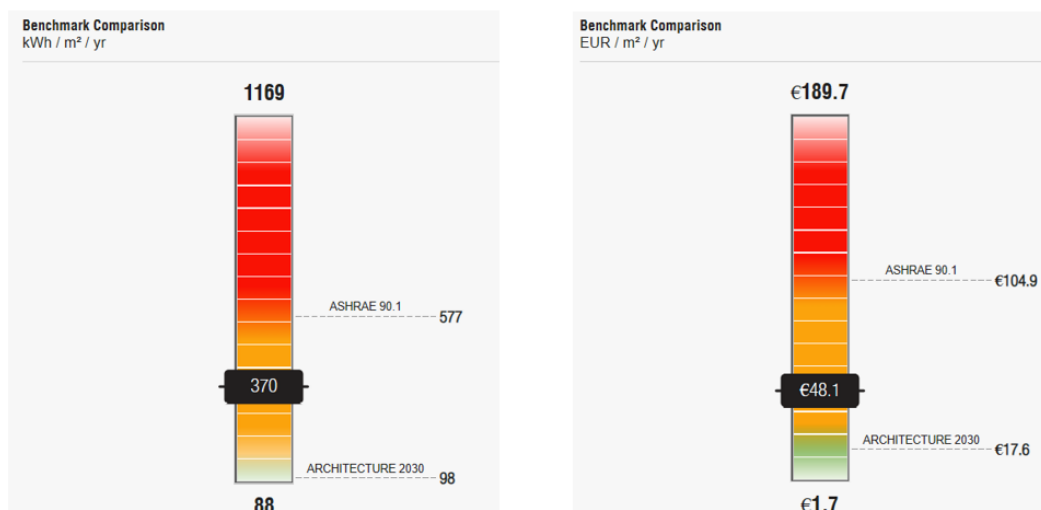
	DISTRICTCOOLING:FACILITY {Maximum}[W]	DISTRICTCOOLING:FACILITY {TIMESTAMP}	COOLING:DISTRICTCOOLING {AT MAX/MIN} [W]
January	493673.39	03-JAN-14:00	493673.39
February	571553.57	10-FEB-15:30	571553.57
March	749206.78	11-MAR-11:00	749206.78
April	698320.63	17-APR-11:00	698320.63
May	826739.11	19-MAY-15:45	826739.11
June	817556.97	18-JUN-15:00	817556.97
July	891342.09	28-JUL-11:30	891342.09
August	928488.75	18-AUG-15:00	928488.75
September	974591.51	19-SEP-15:30	974591.51
October	1008059.56	01-OCT-15:15	1008059.56
November	755716.70	03-NOV-14:30	755716.70
December	503370.38	15-DEC-14:45	503370.38
Annual Sum or Average			
Minimum of Months	493673.39		493673.39
Maximum of Months	1008059.56		1008059.56

Αφού τελειώσει η διαδικασία της ενεργειακής ανάλυσης του κτιρίου, μπορούμε μέσω της εντολής *Energy Optimization* να δούμε αναλυτικά πόσες kWh καταναλώνει το κτίριο για κάθε m², καθώς και το κόστος της ετήσιας ενεργειακής του κατανάλωσης ανά m², όπως φαίνονται στις Εικόνες. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης δείχνουν ότι η κατασκευή καταναλώνει 370 kWh/m²/yr και το κόστος ανέρχεται στα 48.1 EUR/m²/yr.

Σχήμα 8-11: Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου ανά m²



Σχήμα 8-12: Ετήσιο κόστος ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου ανά m^2



(α)

(β)

Σχήμα 8-13: Διαγράμματα (α) ενεργειακής κατανάλωσης και (β) κόστους που απαιτείται ετησίως ανά m^2

Στο Σχήμα 8-13 παρατηρούμε δύο νέες έννοιες: ASHRAE 90.1, ARCHITECTURE 2030. Το πρότυπο ASHRAE 90.1 αποτελεί το ενεργειακό πρότυπο για όλα τα κτίρια, εκτός από τα κτίρια χαμηλής κατοικίας, το οποίο δημιουργήθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων της Αμερικής. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό ορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις που πρέπει να ισχύουν για να οριστεί ένα κτίριο ως ενεργειακά αποδοτικό. Αντίστοιχα, ο όρος ARCHITECTURE 2030 στοχεύει στη μείωση εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου που συμβάλουν στην κλιματική αλλαγή και αφορά κάθε δομημένη περιοχή. Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η στάθμη ενεργειακής κατανάλωσης της υπό μελέτη κατασκευής είναι 370 kWh/m²/yr και βρίσκεται ενδιάμεσα από τις στάθμες των δύο προτύπων, με αποτέλεσμα να μην εντάσσεται εξ ολοκλήρου στα «Πράσινα Κτίρια». Η ενέργεια υπολογίζεται σε EUl (Energy Use Intensity) που δηλώνει την ενέργεια που καταναλώνει το κτίριο ετησίως ανά τετραγωνικό μέτρο από την συνολική επιφάνεια.

Με βάση τις διατάξεις του Υπουργείου Ενέργειας, η ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου γραφείων κατά μέση τιμή ανέρχεται στις 22.5 kWh/m² και αποτελεί σχεδόν το 19% του συνόλου των δαπανών. Τα έξοδα κατανάλωσης ενέργειας ξεπερνούν τα 30.000 ευρώ ετησίως, ένα αρκετά σημαντικό ποσό που πολλές φορές οι εταιρείες αγνοούν ή αδυνατούν να προσδιορίσουν. Επίσης, σε ευρωπαϊκό επίπεδο το 75% του συνόλου των κτιρίων δεν θεωρούνται ενεργειακά αποδοτικά. Επομένως, για την καλύτερη οικονομική διαχείριση και την εξοικονόμηση κόστους ενέργειας, κάθε επιχειρηματικός κλάδος οφείλει να έχει πλήρη εποπτεία των ενεργειών της και να γνωρίζει ακριβώς τον χρόνο και τον τρόπο με τον οποίο ξοδεύεται η ενέργεια. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται κατά προσέγγιση η ενέργεια κατανάλωσης ενός εμπορικού κτιρίου για κάθε επιμέρους τομέα.

- Σύστημα και εξοπλισμός ψύξης: 8 kWh/m²
- Σύστημα φωτισμού: 7 kWh/m²
- Σύστημα κλιματισμού (HVAC): 3 kWh/m²
- Εξοπλισμός θέρμανσης: 2 kWh/m²
- Σύστημα εξαερισμού: 2 kWh/m²
- Σύστημα θέρμανσης νερού: 5 kWh/m²

Συνεπώς, προτείνονται τα παρακάτω μέτρα προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα περισσότερο βιώσιμο και αποδοτικό εργασιακό περιβάλλον στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης, μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου έως και 50%:

Καλύτερος σχεδιασμός των ανοιγμάτων και των θυρών

Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας εντός και εκτός του κτιρίου, συχνά διαφεύγει προς τα έξω η θερμότητα ή ο ψυχρός αέρας από τα δωμάτια μέσω μικρών κενών στα παράθυρα και τις πόρτες. Κατά συνέπεια, χάνεται μεγάλο μέρος της ενέργειας η οποία παράγεται από τα συστήματα HVAC του κτιρίου. Με κατάλληλα στεγανωτικά υλικά τοποθετημένα στα κενά των θυρών, όπως μονωτικές ταινίες ή υαλοπροσόψεις, μπορούμε να περιορίσουμε αυτό το πρόβλημα και να μειώσουμε σημαντικά το κόστος κατανάλωσης ενέργειας ελαχιστοποιώντας τους χρόνους λειτουργίας των κλιματιστικών. Εναλλακτικά, προτείνεται η αντικατάσταση των συμβατικών θυρών με περιστρεφόμενες οι οποίες, κρατώντας τον εσωτερικό χώρο κλειστό όταν δεν υπάρχει μετακίνηση των ατόμων, καθίστανται περισσότερο αποδοτικές.

Εγκατάσταση έξυπνων θερμοστατών

Οι θερμοστάτες συνδέονται με τα συστήματα HVAC και διατηρούν την επιθυμητή θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου. Η τεχνολογία IoT επιτρέπει την πρόσβαση στο διαδίκτυο, με αποτέλεσμα οι θερμοστάτες να μπορούν να προσδιορίσουν τις θερμοκρασιακές διαφορές μέσα και έξω από το κτίριο και να ρυθμίζουν την εσωτερική θερμοκρασία στο επιθυμητό επίπεδο. Ακόμη, οι θερμοστάτες διαθέτουν αισθητήρες κίνησης και έτσι μπορούν να αυξομειώνουν τη θερμοκρασία κάθε δωματίου με βάση την πληρότητά του. Ο διαχειριστής του κτιρίου μπορεί, μάλιστα μέσω του κινητού του να ρυθμίζει την λειτουργία των θερμοστατών εξ αποστάσεως ή να ορίζει ένα σταθερό χρονοδιάγραμμα για να μειώσει τα λειτουργικά κόστη.

Ενίσχυση του φυσικού φωτισμού

Οι μηχανικοί είναι σημαντικό να αξιοποιήσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τον φυσικό φωτισμό του κτιρίου ώστε να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση μέσω των λαμπτήρων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον κατάλληλο σχεδιασμό, όπως την προσθήκη φεγγιτών ή την τοποθέτηση των ανοιγμάτων προς τα νότια ενισχύοντας το φυσικό φως. Μία άλλη λύση είναι η εγκατάσταση ηλιακών παραθύρων τα οποία απορροφούν το φως του ηλίου χωρίς εκπομπές.

Έξυπνα συστήματα φωτισμού

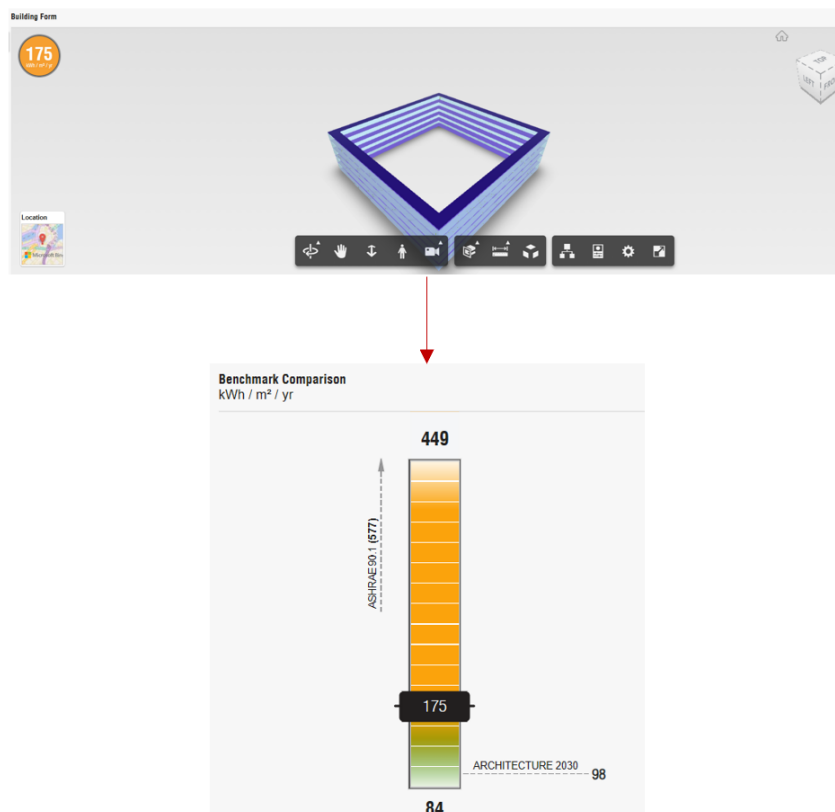
Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν την τεχνολογία IoT και διαθέτουν αισθητήρες κίνησης. Έτσι, όταν κάποιος χώρος του κτιρίου είναι άδειος ή σε δωμάτια όπου παρατηρείται λιγότερη κινητικότητα τα φώτα κλείνουν αυτόματα, χωρίς να σπαταλούν ηλεκτρική ενέργεια. Συχνά παρατηρείται η εγκατάλειψη ενός κτιρίου με ανοιχτό τον φωτισμό, κάτι που σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να διορθωθεί με την αυτόματη απενεργοποίησή του. Προτείνεται, επίσης, η αντικατάσταση των λαμπτήρων πυρακτώσεως με λαμπτήρες LED οι οποίοι είναι κατά 80% αποδοτικότεροι και διαρκούν έως 10 φορές περισσότερο. Τέλος,

ο διαχειριστής του κτιρίου μπορεί να ρυθμίσει τη λειτουργία των λαμπτήρων εξ αποστάσεως μέσω του κινητού του.

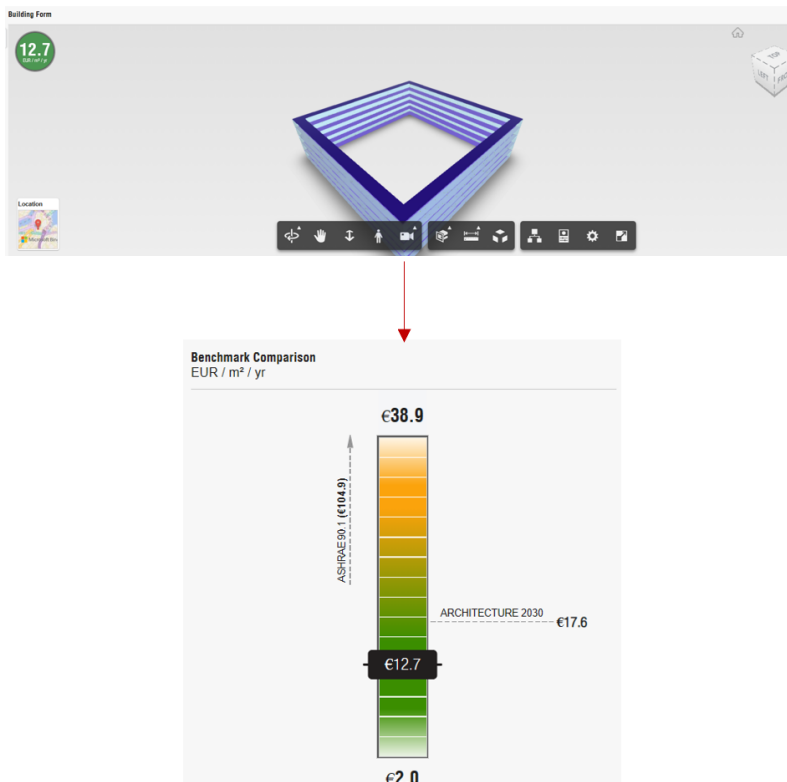
Η εφαρμογή του πράσινου προτύπου LEED

Η κατασκευή ή η ανακατασκευή ενός κτιριακού έργου σύμφωνα με το πρότυπο LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) στοχεύει στον βιοκλιματικό σχεδιασμό, την καλύτερη διαχείριση του νερού και των ενεργειακών πόρων, την επιλογή των πιο ποιοτικών υλικών και την βέλτιστη ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Τα κτίρια LEED συνήθως έχουν κόστος κατασκευής 2% περισσότερο σε σχέση με τα απλά κτίρια, αλλά έχοντας εξασφαλίσει την βέλτιστη ενεργειακή απόδοση αυτό το πρόσθετο κόστος αποκαθίσταται εντός λίγων ετών.

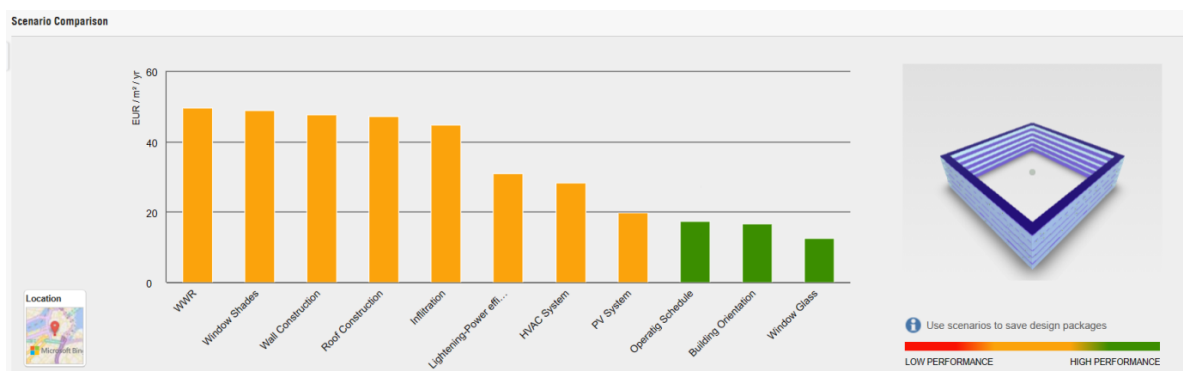
Βελτιώνοντας, λοιπόν, ορισμένους παράγοντες ώστε να πλησιάσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τα χαρακτηριστικά ενός ενεργειακά αποδοτικού κτιρίου κατά BIM, μειώνεται σημαντικά η ενεργειακή κατανάλωση και φτάνει να έχει υψηλή αποδοτικότητα, να θεωρείται δηλαδή ένα Πράσινο Κτίριο. Οι παράγοντες που μετατρέπονται φαίνονται στο Σχήμα 8-16. Τελικά, η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται στις 175 kWh/m²/yr και το κόστος στα 12.7 EUR/m²/yr.



Σχήμα 8-14: Βελτιωμένη ενεργειακή κατανάλωση ετησίως ανά m²



Σχήμα 8-15: Μειωμένο κόστος ενεργειακής κατανάλωσης ετησίως ανά m²



Σχήμα 8-16: Σχηματική απεικόνιση σε διάγραμμα της εξοικονόμησης της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, μετά τη συνολική έρευνα, μελέτη και σύνταξη της Διπλωματικής Εργασίας, δημιουργήθηκαν διάφορα ερωτήματα τα οποία βοήθησαν στην καλύτερη κατανόηση του επαγγέλματος του Πολιτικού Μηχανικού και στο όραμα εξέλιξής του. Αρχικά, με τη χρήση της τεχνολογίας ΜΔΠ μπορεί να επιτευχθεί ένας πιο ποιοτικός και αποδοτικός σχεδιασμός ενός μοντέλου, χάρη στην άρτια επικοινωνία την οποία διαθέτουν τα αντίστοιχα προγράμματα BIM μεταξύ τους και στην δυνατότητα λειτουργίας τους σε όλα τα στάδια της φάσης ζωής του έργου. Επίσης, οι μηχανικοί έχουν τη δυνατότητα να αποκτούν καλύτερη εποπτεία του συνολικού έργου με τη βοήθεια του τρισδιάστατου μοντέλου το οποίο περιλαμβάνει όλη την πληροφορία και τα δεδομένα της υπό μελέτης κατασκευής. Τα προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούν την τεχνολογία BIM εξασφαλίζουν τη ανεμπόδιση ροή των δεδομένων μεταξύ τους χωρίς να παρουσιάζονται απώλειες, με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή η ταυτόχρονη επεξεργασία του μοντέλου από μία ομάδα μηχανικών και η άμεση επικοινωνία για την παρεμπόδιση εμφάνισης κάποιου σφάλματος.

Όσον αφορά τον ποιοτικό έλεγχο της κατασκευής, η τεχνολογία BIM προσφέρει τη δυνατότητα χρονικού προσδιορισμού της ολοκλήρωσης των εργασιών και τη συνολική κοστολόγηση του έργου, γεγονός που οδηγεί στην λήψη σωστών μέτρων προκειμένου να μειωθούν περαιτέρω μελλοντικά έξοδα λόγω λανθασμένου σχεδιασμού. Ακόμη, αρκετά προγράμματα μπορούν να αναλύσουν την ενεργειακή απόδοση του έργου λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που μπορεί να προκαλέσουν οποιαδήποτε περιβαλλοντική επίπτωση. Έτσι, ως κεντρική ιδέα εδραιώνεται η σχεδίαση ενός αποδοτικού έργου στα πλαίσια της σύγχρονης βιωσιμότητας. Τέλος, η τεχνολογία BIM βοηθά στον συνεχή έλεγχο της ποιότητας του έργου, επιτρέποντας την πραγματοποίηση αλλαγών από τον αρχικό σχεδιασμό του μοντέλου για να μην υπάρχουν αποκλίσεις.

Ακολούθως, μετά την μελέτη της διαστασιολόγησης του κτιρίου βγάζουμε κάποια συμπεράσματα για τις διατομές που επιλέχθηκαν. Αρχικά, η συμπερίληψη της στρωφικής δέσμευσης την οποία προσφέρει το χαλυβδόφυλλο στο πάνω πέλμα των σύμμικτων δευτερευουσών δοκών κατά Υ βοήθησε στην επιλογή μικρότερης διατομής. Για την επιλογή της τελικής διατομής των κύριων δοκών κατά Χ κρίθηκαν κρισιμότεροι οι έλεγχοι επάρκειας των μελών στους συνδυασμούς φόρτισης σε Ο.Κ.Α., ενώ για τα υποστυλώματα πιο καθοριστικός θεωρήθηκε ο έλεγχος αντισεισμικού σχεδιασμού τους. Ακόμη, με την εξασφάλιση της διαφραγματικής λειτουργίας του κάθε πλαισίου μηδενίζονται οι αξονικές δυνάμεις για τις δοκούς κατά τις δύο διευθύνσεις, απλοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τους ελέγχους επάρκειας και

αντοχής των μελών. Επιπρόσθετα, ενώ αρχικά είχαν επιλεγθεί συνδέσεις ροπής μεταξύ των μελών και ως στηρίξεις έδρασης οι πακτώσεις, οι δοκοί κατά Χ και Υ επιβαρύνονταν με μεγάλες τιμές ροπών M_y και στα υποστυλώματα μεταφέρονταν πολύ μεγάλες αξονικές δυνάμεις, γεγονός που οδηγούσε στην επιλογή πολύ μεγάλων μη αποδεκτών διατομών. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε τελικά η σύνδεση των μελών με τις κατάλληλες ελευθερώσεις ροπής όπως αναφέρονται στην ενότητα 5.4 και οι στηρίξεις με τις ελευθερώσεις που περιγράφονται στην ενότητα 3.1. Η σύνδεση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των υποστυλωμάτων και των κύριων δοκών κατά Χ και κατά Υ αποτελεί σύνδεση τέμνουσας. Όσον αφορά τη δεύτερη σύνδεση, το ποσοστό απόδοσής της βγήκε πολύ μικρό εξαιτίας της μικρής τέμνουσας που καταπονεί το πλαίσιο. Τα εξωτερικά πλαίσια υποστυλωμάτων και δοκών συνδέονται μέσω συγκόλλησης λόγω του μικρού μήκους των εξωτερικών δοκών, μιας και αν επιλεγόταν κοχλιωτή σύνδεση θα καταλήγαμε σε μία εξαιρετικά δαπανηρή και δύσκολα εφαρμόσιμη λύση. Τέλος, ενώ το υπάρχων κτίριο γραφείων έχει σχεδιαστεί στην πραγματικότητα με έξυπνα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας, με την ενεργειακή ανάλυση που προσομοιώθηκε για πενήνήμερη λειτουργία του αποδείχθηκε ότι δεν πληροί τις προδιαγραφές BIM για ένα «Πράσινο Κτίριο».

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βάγιας Ι. (2003) «Σιδηρές κατασκευές - Ανάλυση και διαστασιολόγηση». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι., Γαντές Χ., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2013) «Παραδείγματα εφαρμογής σε ειδικά θέματα μεταλλικών κατασκευών». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
3. Βάγιας Ι. (2018) «Σύμμικτες κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα, 4η έκδοση». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
4. EN1990, Ευρωκώδικας 0, «Βασικές αρχές σχεδιασμού», CEN(2002).
5. EN1991-1-1, Ευρωκώδικας 1, «Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις στις κατασκευές», Μέρος 1-1: Γενικές δράσεις - Πυκνότητες, ίδιο βάρος, επιβαλλόμενα φορτία σε κτίρια, CEN, Απρίλιος 2002.
6. EN1991-1-3, Ευρωκώδικας 1, «Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις στις κατασκευές», Μέρος 1-3: Φορτία χιονιού, CEN, Ιούλιος 2003.
7. EN1991-1-4, Ευρωκώδικας 1, «Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις στις κατασκευές», Μέρος 1-4: Γενικές δράσεις - Δράσεις ανέμου, CEN, Απρίλιος 2005.
8. EN1993-1-1, Ευρωκώδικας 3, «Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1- 1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN, Μάιος 2005.
9. EN1993-1-8, Ευρωκώδικας 3, «Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-8: Σχεδιασμός κόμβων, CEN, Μάιος 2005.
10. EN1994-1-1, Ευρωκώδικας 4, «Σχεδιασμός σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα», Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN, 2004.
11. EN1998-1, Ευρωκώδικας 8, «Αντισεισμικός σχεδιασμός», Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια, CEN, Δεκέμβριος 2004.
12. ArcelorMittal Beams Calculator, Constructalia,
<https://constructalia.arcelormittal.com/en/tools/software>
13. Bakogiannis E., Papadaki K., Kyriakidis, Potsiou (2020). "MDPI: How to adopt BIM in the building construction sector across Greece?" <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/4/1371>
14. Benito B., Bernal. A., Torres Y., Hermanns L. (2010). "Comparative analysis between elastic response spectra of different European Codes." Universidad Politécnica de Madrid, [https://oa.upm.es/7705/1/INVE MEM 2010 78610.pdf](https://oa.upm.es/7705/1/INVE_MEM_2010_78610.pdf)

15. Borrmann A., König M., Koch M., Beetz J. (2018). "Building Information Modeling, Technology Foundations and Industry Practice."
16. Bouskaa R. (2016). "Evaluation of maturity of BIM tools across different software platforms." Creative Construction Conference 2016 (CCC 2016), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816339893>
17. Carletti C., Sciarpi F., Pierangioli L. (2014). "The Energy Upgrading of Existing Buildings: Window and Shading Device Typologies for Energy Efficiency Refurbishment." <https://doi.org/10.3390/su6085354> [18/08/2014]
18. Cheng E.W.L., Chiang Y.H., Ryan N. (2013). "Enhancing Knowledge Sharing Using BIM Technology in Construction." Knowledge and Asset Management in Sustainable Civil Engineering, <https://doi.org/10.1155/2013/170498>
19. Davies K., Wilkinson S., McMeel D. (2017). "A review of specialist role definitions in BIM guides and standards." Journal of Information Technology in Construction, <http://www.itcon.org/2017/10>
20. Enscape chaos, <https://enscape3d.com/>
21. Fai a S., Rafeito a J. (2014). "Establishing an appropriate level of detail (LOD) for a Building Information Model (BIM).", West Block, Parliament Hill. Ottawa, Canada, https://www.researchgate.net/publication/304506110_Establishing_an_Appropriate_Level_of_Detail_LoD_for_a_Building_Information_Model_BIM_-_West_Block_Parliament_Hill_Ottawa_Canada
22. Firoz S., Kanakambara Rao K. (2012). "Modelling Concept of Sustainable Steel Building by Tekla Software." https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/civil_engineering/Modelling%20Concept.pdf
23. Gerrish T., Ruikar K., Cook M., Johnson M., Phillip M., Lowry C. (2017). "BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential." <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.032> [1/06/2017]
24. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O., Raahemifar K. (2017). "Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges." Open overlay panel, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
25. Glass panels for construction building, <https://www.safsteelstructure.com/glass-panels-for-construction-building/>
26. Haider U. , Khan Us., Nazir As., Humayon M. (2020). "Cost Comparison of a Building Project by Manual and BIM." Civil Engineering Journal 2020, <https://pdfs.semanticscholar.org/0451/42cbf107932d0a8627314e0892cc65b5de3e.pdf>
27. Hattab M., Hamzeh F. (2013). "Information flow comparison between traditional and BIM-based projects in the design phase." https://www.researchgate.net/profile/Farook-Hamzeh/publication/258885932_Information_Flow_Comparison_Between_Traditional_and_BIM-Based_Projects_in_the_Design_Phase/links/0c9605295adae056b4000000/Information-Flow-Comparison-Between-Traditional-and-BIM-Based-Projects-in-the-Design-Phase.pdf
28. Khudhair A., Haijiang Li, Guoqian Ren, Song Liu (2021). "Towards Future BIM Technology Innovations: A Bibliometric Analysis of the Literature." <https://doi.org/10.3390/app11031232> [29/01/2021]
29. Migilinskasa D., Popovb V., Juoceviciusc V., Ustinovichiusd L. (2013). "The Benefits, Obstacles and Problems of Practical BIM Implementation." 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius Gediminas Technical University, www.sciencedirect.com

30. Mild Steel Sheets, plates and floor plates, <https://www.steelexpress.co.uk/structuralsteel/sheets.html>
31. Newton K., Chileshe N. (2012). "Awareness, usage and benefits of Building Information Modelling (BIM) adoption-the case of the south Australian construction organisations." Chileshe School of Natural and Built Environments, University of South Australia, City East Campus, https://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2012-0003-0012_Newton_Chileshe.pdf
32. Revit 2021, Autodesk, <https://www.autodesk.com/>
33. Robot Structural Analysis 2021, Autodesk, <https://www.autodesk.com/>
34. SP200 staircase system, <https://www.steelpro.fi/en/product/sp200-staircases/>
35. Strafacci A. (2008). "What does BIM mean for Civil Engineers?"
36. Svalestuen F., Lohne J, Sommerseth H., Augdalc S., Lædrea O. (2017). "Use of LoD decision plan in BIM-projects." Creative Construction Conference 2017 (CCC 2017), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817330898>
37. TATA Steel: ComFlor 60, <https://www.tatasteeleurope.com/construction/products/flooring/composite-floor-deck/comflor-60>
38. The Weight of Double and Triple Glass Units, <https://glazingcentre.co.uk/the-weight-of-double-and-triple-glass-units/> [22/02/2021]
39. Trania M. L., Cassano M., Todaro D., Bossia B. (2015). "BIM level of detail for construction site design." Creative Conference 2015, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815032129>
40. Ullah K., Lill I., Witt E. (2019). "An Overview of BIM Adoption in the Construction Industry: Benefits and Barriers." Department of Civil Engineering and Architecture, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia, <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/S251628532019000002052/full/html>
41. Vollaro R. D. L., Guattari C., Evangelisti L., Battista G., Carnielo E., Gori P. (2015). "Building energy performance analysis: A case study." <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.080> [1/01/2015]
42. Yaling He, Yixing Chen, Zihua Chen, Zhang Deng, Yue Yuan (2022). "Impacts of Occupant Behavior on Building Energy Consumption and Energy Efficiency Standards." <https://doi.org/10.3390/buildings12081108> [27/07/2022]
43. Zara Offices in Arteixo/Battleiroig. ArchDaily, https://www.archdaily.com/988928/zarom-offices-in-arteixo-battleiroig?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_projects
44. Zhou X., D'Aniello S. P., Hong-Zeng Yu (2012). "Spray Characterization measurements of a pendent fire sprinkler." <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.07.007>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΜΙΚΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ-ΔΟΚΟΥ

A1 Έλεγχος σύμμικτης πλάκας

Full Output

Note: Section Designed to Eurocodes, United Kingdom National Annex

Construction Stage:	PASS	Max Unity Factor:	0.08
Normal Stage:	PASS	Max Unity Factor:	0.15
Fire Condition:	PASS	Max Unity Factor:	0.08
Serviceability:	SATISFACTORY	Max Unity Factor:	0.06

*** Section Adequate ***

Floor Plan Data (propped composite construction with ComFlor 60/1.2/S350 decking)

Beam centres - equal	1.25 m	Profile span type	Multi-span
Beam or wall width	160 mm	Propping	Single (at 1/2 span)
Prop width	100 mm		

Concrete span type End

Profile Data (ComFlor 60/1.2/S350 decking.)

Depth	60 mm	Pitch of deck ribs	300 mm
Trough width	120 mm	Crest width	130.7 mm
Nominal sheet thickness	1.20 mm	Design sheet thickness	1.16 mm
Deck weight	0.14 kN/m ²	Yield strength	350 N/mm ²

Concrete Slab (Normal Weight Concrete ; Grade C30/37; Mesh : A142)

Overall slab depth	130 mm		
Concrete characteristic strength	30 N/mm ²	Concrete wet density	2550 kg/m ³
Modular ratio	10	Concrete dry density	2450 kg/m ³
Bar reinforcement	None		
Mesh reinforcement :			
Mesh	A142	Yield strength	500 N/mm ²
Cover to Mesh	30 mm	Mesh Layers	Double
Account for End Anchorage	No	Shear connectors per rib	N/A
Diameter of Shear Connectors	N/A		
Screeds	N/A		

Section Properties

*** Note - 1: All values of inertia are expressed in steel units

*** Note - 2: Average inertia is used for deflection calculations for the composite stage

*** Note - 3: Cracked dynamic inertia is used for natural frequency calculations

Deck Profile

Sagging Inertia, I _y	132.910 cm ⁴ /m	Area of profile (Net), A _p	1721 mm ² /m
Hogging Inertia, I _y	121.600 cm ⁴ /m	Effective area of profile	1576.00 mm ² /m

Composite

Inertia, I _y - Uncracked	1591 cm ⁴ /m	Inertia, I _y - Cracked	884 cm ⁴ /m
Average inertia	1238 cm ⁴ /m	Cracked inertia (dynamic)	1000 cm ⁴ /m
Shear bond coefficients - Tau	0.26		
Concrete volume	0.097 m ³ /m		

Loads Acting on Slab (Actions)

*** Note: Slab subjected to uniformly distributed loads (UDL) ONLY

Imposed (occupancy)	2.80 kN/m ²	Partitions	0.50 kN/m ²
Ceilings and services	0.50 kN/m ²	Finishes	0.50 kN/m ²
Self weight of concrete slab (wet)	2.44 kN/m ²	Self weight of decking	0.14 kN/m ²
Self weight of concrete slab (dry)	2.34 kN/m ²	Screeds	None
Construction load	1.50 kN/m ²		

Line Loads Perpendicular to Deck Span (Actions)

None

Line Loads Parallel to Deck Span (Actions)

None

Fire Data

Design method	Mesh + Deck Method	Fire resistance period	60 mins
Non-permanent imposed loads	N/A		

Partial Safety Factors**Actions**

Permanent, gamma G	1.35
Permanent - accidental, gamma GA	N/A
Variable, gamma Q	1.50
Combination factor - Fire, psi 1	0.70
Combination factor, psi 0	0.70

Materials

Structural steel - elastic, gamma M0	1.00
Structural steel - buckling, gamma M1	1.00
Concrete, gamma C	1.50
Reinforcement, gamma S	1.15
Combination factor, psi 2	0.60

Construction Stage**Loadings**

	@ SLS (kN/m ²)	@ ULS (kN/m ²)
Self weight of decking	0.14	0.18
Self weight of concrete slab (wet)	2.44	3.66
Reinforcement	0.05	0.07
Total weight of slab	2.62	3.91
Construction live load	0.75	1.13
Construction live load patch	0.75	1.13

Effective Span of DeckEffective span L_e , is the smaller of

- 1) c/c of supports = 1.25 m
 - 2) clear span + deck depth = $0.50 + 60.0 / 1000$
= .56 m
- Therefore L_e = 0.56 m

Shear Resistance Check (BS EN 1993-1-3 Clause 6.1.5 and 6.1.7.3)

Applied shear	2.08 kN/m			
Web shear resistance, P_v	100.15 kN/m	Unity Factor	0.02	PASS
Applied reaction	4.05 kN/m			
Web crushing resistance, P_w	51.93 kN/m	Unity Factor	0.08	PASS

Bending Resistance Check (BS EN 1993-1-3 Clause 6.1.4.1)**Sagging**

Max applied moment	0.18 kNm/m			
Moment resistance	15.21 kNm/m	Unity Factor	0.01	PASS

Hogging

Applied moment	0.21 kNm/m			
Moment resistance	13.07 kNm/m	Unity Factor	0.02	PASS

Combined Effects**Bending and Web Crushing (BS EN 1993-1-3 Clause 6.1.11)**

Design unity factor is the worst case of

1. Maximum hogging:
 $(4.05 / 51.93 + 0.21 / 13.07) / 1.25 = 0.08$ 2. Maximum reaction:
 $(4.05 / 51.93 + 0.21 / 13.07) / 1.25 = 0.08$ Design unity factor = 0.08 PASS**Bending and Shear (BS EN 1993-1-3 Clause 6.1.10)**

*** Note: Low shear - This check is not required

Design unity factor is the worst case of

1. Maximum hogging:
 $(2.72 / 51.93 + 0.14 / 13.07) / (0.9 * 1.25) = 0.06$ 2. Maximum reaction:
 $(2.72 / 51.93 + 0.14 / 13.07) / (0.9 * 1.25) = 0.06$ Design unity factor = 0.06 PASS**Deflection**

Allowable deflection is the lesser of

- 1) Effective span / deflection limit without ponding = 3.08 mm
 - 2) Deflection limit without ponding, absolute maximum value = 20.00 mm
 - 3) Slab depth / 10 = 13.00 mm
- Max self weight deflection = 0.01mm <= 3.08mm

SATISFACTORY

Normal Stage**Span**

The effective composite span is 1.19 m

Loadings

	@ SLS (kN/m ²)	@ ULS (kN/m ²)
Dead (Profile, concrete, reinforcement)	2.53	3.41
Imposed	3.30	4.95
Superimp (Ceiling, services, screed, finishes)	1.00	1.35
Total	6.83	9.71

All line and point described above in 'Loading Details' are applied at the Normal stage

Shear Resistance Check**Vertical Shear (BS EN 1992-1-1 Clause 6.2.2)**

Maximum applied shear 5.55 kN/m
 Shear resistance of end diaphragm (ComFlor 225 only) 0.00 kN/m ***test value

Vertical shear resistance is the greater of:

- $(0.54 * 400.00 * 96.15) / 1000 + 0.00$
- $(0.12 * 2.00 * (100 * 0.02 * 30.00)^{1/3}) * 400.00 * 96.15 / 1000 + 0.00$

= 36.14 kN/m

Unity Factor = $5.55/36.14 = 0.15 < 1$

PASS

Punching Shear (BS EN 1994-1-1 Clause 9.7.6)

N/A - no concentrated loads have been applied

Bending Resistance Check (BS EN 1994-1-1 Clause 9.7.2)

Applied bending moment 1.65 kNm/m
 Depth of concrete stress block 8.21 mm
 Lever arm 92.72 mm
 Compression in concrete 139.51 kN/m
 Moment Resistance 27.14 kNm/m

Unity Factor = $1.65/27.14 = 0.06 < 1$

PASS

Fire Resistance

Effective span in fire 1.10 m
 Fire total UDL 5.84 kN/m²
 Fire free moment 0.88 kNm/m
 Moment resistance 9.10 kNm/m
 Total moment resistance 11.13 kNm/m
 Unity Factor 0.08

PASS

Deflection**Properties**

Modular ratio 10.00
 Uncracked section inertia 15913310.00 mm⁴
 Cracked section inertia 8840682.00 mm⁴

Deflection Checks

Imposed load deflection 0.03 mm
 Allowable deflection (20 mm max) 20.00 mm
 Total deflection 0.06 mm
 Allowable deflection 4.74 mm

SATISFACTORY

PASS

Dynamic Sensitivity

Dynamic inertia (cracked section) 999.90 cm⁴
 Maximum deflection 0.05 mm
 Frequency 83.04 Hz

Unity Factor = $5.00/83.04 = 0.06 < 1$

PASS

A2 Έλεγχος σύμμικτης δοκού

DATA

General parameters

Main span

COMPOSITE BEAM
L = 9.000 m

Intermediate beam

Width on the left

$L_1 = 1.250$ m Max. participating width $L_1 = 0.625$ m

Width on the right

$L_2 = 1.250$ m Max. participating width $L_2 = 0.625$ m

Slab

Slab with profiled sheeting

Total thickness = 13.00 cm

Profiled steel sheeting "" , parallel to the beam

(h = 60.0 mm ; e = 300.0 mm ; $b_1 = 120.0$ mm ; $b_2 = 180.0$ mm ; t = 1.20 mm ;
 $h_{sp} = 15.00$ mm ; $f_y = 0$ N/mm² ; M = 10.00 daN/m²)

Section

HE 200 A - S355 EC3

h_t	=	190.0 mm	A	=	53.93 cm ²
b_T	=	200.0 mm	A_w	=	18.98 cm ²
t_w	=	6.5 mm	I_y	=	3692.16 cm ⁴
t_f	=	10.0 mm	I_z	=	1335.51 cm ⁴
r	=	18.0 mm	I_t	=	20.98 cm ⁴
			I_w	=	108000.00 cm ⁶
			$W_{el,y}$	=	388.65 cm ³
			$W_{pl,y}$	=	429.48 cm ³

Materials

Steel

E = 210000 N/mm²
 $\rho = 7850$ kg/m³

Steel grade S355 EC3 - Reduction of f_y with thickness according to Table 3.1

Databases 2022_01

Flanges	f_{yf}	=	355 N/mm ²
Web	f_{yw}	=	355 N/mm ²
Section	f_y	=	355 N/mm ²

$\epsilon = 0.814$

Concrete slab C30/37

$f_{ck} = 30$ N/mm²
 $E_{cm} = 32837$ N/mm²

Modular ratio for LONG TERM

$C_{eq} = 17.96$

Modular ratio for SHORT TERM

$C_{eq} = 6.40$

Shrinkage (R) - Long term

$\epsilon = 300 \cdot 10^{-5}$

Density of the concrete (slab)

$\rho = 25.00$ kN/m³

Reinforcement steel

$f_{yk} = 500$ N/mm²

Connection

Connectors Diameter 19-100

$e = 19.0$ mm
h = 100.0 mm
 $f_y = 350.0$ N/mm²
 $f_u = 450.0$ N/mm²

Main span

L = 9.000 m e = 0.207 m n = 1 row(s)

Total number of connectors : 43

Lateral restraint of the beam - The beam is laterally restrained at supports

Propping in the construction stage

No propping

Loads

Loads at construction stage

Permanent loads (g)

Dead weight of the profile	0.42 kN/m	
Dead weight of the slab (2.58 kN/m ²)		3.23 kN/m

Construction load (Q_c)

$Q_c = 0.75$ kN/m² 0.94 kN/m

Loads at final stage

Permanent loads

Dead weight of the profile	0.42 kN/m
Dead weight of the slab (2.58 kN/m ²)	3.23 kN/m

Partial Factors

Permanent loads

$\gamma_{G,sup}$	=	1.35	Structural steel	γ_{M0}	=	1.00
$\gamma_{G,inf}$	=	1.00	Structural steel (instabilities)	γ_{M1}	=	1.00

Live loads

γ_Q	=	1.50	Concrete	γ_c	=	1.50
			Reinforcement bars	γ_s	=	1.15
			Connectors	γ_v	=	1.25
			Shear resistance of the steel sheeting	γ_{sp}	=	1.10

Combinations of actions

ULS combination (construction stage)	1.35 G + 1.50 Q _c
ULS combination(s)	1.35 G 1.00 G
SLS combination(s)	G + R G + R

CONSTRUCTION stage

Moment resistance	Section Class 2	M _{Rd} =	152.47 kN.m
Plastic shear force resistance	V _{pl,Rd} =	370.59 kN	(η = 1.20)
No risk of shear buckling (h _w /t _w < 72 ε/η EN 1993-1-1 § 6.2.6(6))			
ULS combination (construction stage): 1.35 G + 1.50 Q _c			

Support reactions	R _{V1} =	28.44 kN
	R _{V2} =	28.44 kN

Critical amplification factor / Lateral Torsional Buckling

μ_{cr} = 1.23 (LTBeam calc. module)

M _{Ed,max(+)} =	63.99 kN.m	Γ _M =	0.420	(x = 4.500 m)
V _{Ed,max} =	-28.45 kN	Γ _V =	0.077	(x = 0.000 m)
		Γ _{MV} =	0.420	(x = 4.500 m)
		Γ _{LT} =	0.880	

Maximum criterion for bending resistance	Γ _{M,max} =	0.420
Maximum criterion for shear force resistance	Γ _{V,max} =	0.077
Maximum criterion for bending moment - shear force interaction	Γ _{MV,max} =	0.420
Maximum criterion for lateral torsional buckling	Γ _{LT,max} =	0.880

Serviceability Limit States
(CONSTRUCTION stage)Deflections per load case

Case 'Dead weight'	Span	V _{max} =	40.1 mm (L / 224)
Case 'Construction load' (Q _c)	Span	V _{max} =	10.3 mm (L / 871)
	Total deflection	V _{max} =	50.5 mm (L / 178)

FINAL stage

<u>Participating width</u>	on left support	1.138 m
	L / 4 (= 2.250 m)	1.250 m
	3 L / 4 (= 6.750 m)	1.250 m
	on right support	1.138 m

<u>Moments of inertia</u>	...at mid-span
Long-term	13124 cm ⁴
Short-term	18197 cm ⁴

<u>Resistance of the connectors</u>	P _{Rd} =	81.66 kN
-------------------------------------	-------------------	----------

Verification of the degree of connection

Minimum degree of connection = 0.520

F_{Steel} = 1911.01 kN

F_{Concrete} = 1487.50 kN

Degree of connection = 1.208 > 1

The degree of connection is calculated for the section with maximum bending moment

Plastic resistance - Full connection

Plastic shear force resistance	V _{pl,Rd} =	370.59 kN	(η = 1.20)
--------------------------------	----------------------	-----------	------------

No risk of shear buckling (h_w/t_w < 72 ε/η)

ULS combination: 1.35 G

ULS combination : 1.35 G

		Support reactions		$R_{V1} =$	22.12 kN	
				$R_{V2} =$	22.11 kN	
Calculation of the transverse reinforcement ratio of slab :				$A_w/s_f >$	1.96 cm ² /m	
$M_{Ed,max(+)} =$	49.76 kN.m	$M_{Ed,max(-)} =$	0.00 kN.m	$\Gamma_M =$	0.154	(x = 4.500 m)
$V_{Ed,max} =$	-22.11 kN			$\Gamma_V =$	0.060	(x = 0.000 m)
				$\Gamma_{MV} =$	0.154	(x = 4.500 m)
				$\Gamma_{Vh} =$	0.561	

ULS combination : 1.00 G

		Support reactions		$R_{V1} =$	16.38 kN	
				$R_{V2} =$	16.38 kN	
Calculation of the transverse reinforcement ratio of slab :				$A_w/s_f >$	1.96 cm ² /m	
$M_{Ed,max(+)} =$	36.86 kN.m	$M_{Ed,max(-)} =$	0.00 kN.m	$\Gamma_M =$	0.114	(x = 4.500 m)
$V_{Ed,max} =$	-16.38 kN			$\Gamma_V =$	0.044	(x = 0.000 m)
				$\Gamma_{MV} =$	0.114	(x = 4.500 m)
				$\Gamma_{Vh} =$	0.561	

Minimum transverse reinforcement ratio :
(EN 1994-1-1 §6.6.6.3 & EN 1992-1-1 §9.2.2(5))

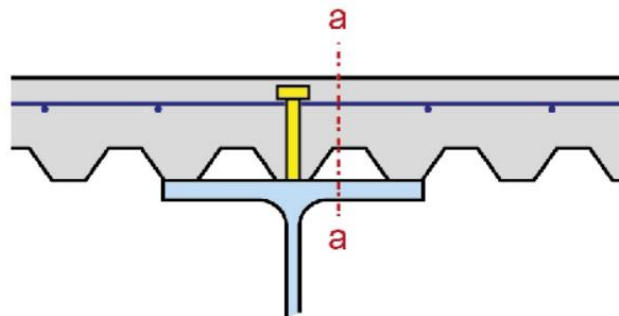
$$\rho_{w,min} = 0.09 \%$$

$$A_w/s_f > 0.61 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Reinforcement ratio (EN 1992-1-1 §6.2.4):

$$A_w/s_f > 1.96 \text{ cm}^2/\text{m} (\rho_w > 0.28 \%)$$

Note: this result is provided as an indication.
Calculations must be performed in order to take into account specific conceptual details.
Note particularly that the calculations do not include the design of the slab.



Calculation according to the reinforcement configuration displayed above
Transverse reinforcement is assumed to be uniform along the length of the beam
Any other configuration requires a specific calculation
the reinforcement of a composite slab is generally provided by one layer only.
In order to transfer the longitudinal shear, the connectors should necessarily go through the reinforcement.
When another layer is added either in the sheeting ribs or in the slab,
their influence can be considered with a specific calculation.
The contribution of non continuous profiled steel sheeting to the longitudinal shear resistance
has not been considered.

Plastic moment in span	$M_{pl,Rd} =$	322.23 kN.m
Maximum criterion for bending resistance	$\Gamma_{M,max} =$	0.154
Maximum criterion for shear force resistance	$\Gamma_{V,max} =$	0.060
Maximum criterion for bending moment - shear force interaction	$\Gamma_{MV,max} =$	0.154
Maximum criterion for longitudinal shear force resistance of slab	$\Gamma_{Vh,max} =$	0.561

Deflections per load case

Case 'Dead weight' $V_{max} = 40.1 \text{ mm (L / 224)}$

Case 'Other permanent loads' $V_{max} = 0.0 \text{ mm}$

Case 'Q₁' $V_{max} = 0.0 \text{ mm}$

Case 'Shrinkage (R) - Long term' $V_{max} = 11.6 \text{ mm (L / 779)}$

Deflections per combination

Combination SLS 'G + R' $V_{max} = 51.7 \text{ mm (L / 174)}$

Combination SLS 'G + R' $V_{max} = 51.7 \text{ mm (L / 174)}$

Estimation of the first natural frequency

G + 0.00 Q₁ : 6.22 Hz

G + 0.10 Q₁ : 6.22 Hz

G + 0.20 Q₁ : 6.22 Hz

G + 0.30 Q₁ : 6.22 Hz

G + 0.40 Q₁ : 6.22 Hz

G + 0.50 Q₁ : 6.22 Hz

G + 0.60 Q₁ : 6.22 Hz

G + 0.70 Q₁ : 6.22 Hz

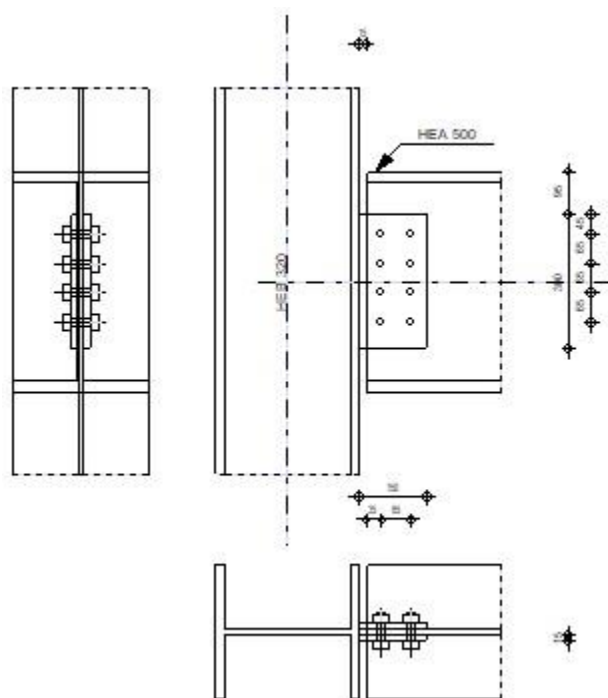
G + 0.80 Q₁ : 6.22 Hz

G + 0.90 Q₁ : 6.22 Hz

G + 1.00 Q₁ : 6.22 Hz

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

Β1 Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια δοκό κατά Χ



Σχήμα Β-1: Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια δοκό κατά Χ

General

Connection no.: 1

Connection name: Beam-column (flange)

Structure node: 868

Structure bars: 957, 1974

Geometry

Column

Section:	HEB 320
Bar no.:	957
$\alpha =$	-90,0 [Deg] Inclination angle
$h_c =$	320 [mm] Height of column section
$b_{fc} =$	300 [mm] Width of column section
$t_{wc} =$	12 [mm] Thickness of the web of column section
$t_{fc} =$	21 [mm] Thickness of the flange of column section
$r_c =$	27 [mm] Radius of column section fillet
$A_c =$	161,34 [cm ²] Cross-sectional area of a column
$I_{yc} =$	30823,50 [cm ⁴] Moment of inertia of the column section
Material:	S 355
$f_{yc} =$	355,00 [MPa] Design resistance
$f_{uc} =$	470,00 [MPa] Tensile resistance

Beam

Section:	HEA 500
Bar no.:	1974
$\alpha =$	0,0 [Deg] Inclination angle
$h_b =$	490 [mm] Height of beam section
$b_b =$	300 [mm] Width of beam section
$t_{wb} =$	12 [mm] Thickness of the web of beam section
$t_{fb} =$	23 [mm] Thickness of the flange of beam section
$r_b =$	27 [mm] Radius of beam section fillet
$A_b =$	197,54 [cm ²] Cross-sectional area of a beam
$I_{yb} =$	86974,80 [cm ⁴] Moment of inertia of the beam section
Material:	S 355
$f_{yb} =$	355,00 [MPa] Design resistance
$f_{ub} =$	470,00 [MPa] Tensile resistance

Plate

Type: bilateral

$l_p = 150$ [mm] Plate length

$h_p = 300$ [mm] Plate height

$t_p = 15$ [mm] Plate thickness

Material: S 355

$f_{yp} = 355,00$ [MPa] Design resistance

$f_{up} = 470,00$ [MPa] Tensile resistance

Bolts

Bolts connecting beam with plate

The shear plane passes through the UNTHREADED portion of the bolt.

Class = 9.8 Bolt class

$d = 18$ [mm] Bolt diameter

$d_0 = 20$ [mm] Bolt opening diameter

$A_s = 1,92$ [cm²] Effective section area of a bolt

$A_v = 2,54$ [cm²] Area of bolt section

$f_{ub} = 900,00$ [MPa] Tensile resistance

$k = 2$ Number of bolt columns

$w = 4$ Number of bolt rows

$e_1 = 45$ [mm] Level of first bolt

$p_2 = 65$ [mm] Horizontal spacing

$p_1 = 65$ [mm] Vertical spacing

Welds

$a_{cp} = 10$ [mm] Butt weld connecting plate with column

Material factors

$\gamma_{M0} = 1,00$ Partial safety factor

$\gamma_{M2} = 1,25$ Partial safety factor

Loads

Case: 40: ULS4 (1+2+3+4+5+6+7+8) *1.35+(9+10+11) *1.50+(13+35) *0.90

$N_{b,Ed} = 0,00$ [kN] Axial force

$V_{b,Ed} = 507,68$ [kN] Shear force

$M_{b,Ed} = 0,00$ [kN*m] Bending moment

Results

Bolts connecting beam with plate

Bolt capacities

$$F_{v,Rd} = \frac{219,8}{6} \text{ [kN]} \quad \text{Shear bolt resistance in the unthreaded portion of a bolt} \quad F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$$

Bolt bearing on the beam

Direction x

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 0,58 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bx} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), p_2/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,58 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd1x} = 118,44 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Direction z

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 0,83 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 0,83 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd1z} = 169,20 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Bolt bearing on the plate

Direction x

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 0,58 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bx} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), p_2/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,58 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2x} = 296,10 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Direction z

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 0,75 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 0,75 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2z} = 380,70 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Forces acting on bolts in the plate - beam connection

Bolt shear

$e = 93$ [mm] Distance between centroid of a bolt group and center of column flange

$M_0 = 47,09$ [kN*m] Real bending moment

$$M_0 = M_{b,Ed} + V_{b,Ed} * e$$

$F_{Vz} = 63,46$ [kN] Component force in a bolt due to influence of the shear force

$$F_{Vz} = |V_{b,Ed}| / n$$

$F_{Mx} = 90,55$ [kN] Component force in a bolt due to influence of the moment

$$F_{Mx} = |M_0| * z_i / \sum z_i^2$$

$F_{x,Ed} = 90,55$ [kN] Design total force in a bolt on the direction x

$$F_{x,Ed} = F_{Nx} + F_{Mx}$$

$F_{z,Ed} = 93,64$ [kN] Design total force in a bolt on the direction z

$$F_{z,Ed} = F_{Vz} + F_{Mz}$$

$F_{Ed} = 130,26$ [kN] Resultant shear force in a bolt

$$F_{Ed} = \sqrt{(F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2)}$$

$F_{Rdx} = 118,44$ [kN] Effective design capacity of a bolt on the direction x

$$F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$F_{Rdz} = 169,20$ [kN] Effective design capacity of a bolt on the direction z

$$F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$	$ 90,55 < 118,44$	verified	(0,76)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$	$ 93,64 < 169,20$	verified	(0,55)
$F_{Ed} \leq F_{v,Rd}$	$130,26 < 219,86$	verified	(0,59)

Verification of the section due to block tearing (shear force)**Plate**

$A_{nt} = 10,50$ [cm²] Net area of the section in tension

$A_{nv} = 27,75$ [cm²] Area of the section in shear

$V_{effRd} = 766,16$ [kN] Design capacity of a section weakened by openings

$$V_{effRd} = 0.5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|0.5 * V_{b,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |253,84| < 766,16 \quad \text{verified} \quad (0,33)$$

Beam

$A_{nt} = 8,40$ [cm²] Net area of the section in tension

$A_{nv} = 31,80$ [cm²] Area of the section in shear

$V_{effRd} = 809,69$ [kN] Design capacity of a section weakened by openings $V_{effRd} = 0.5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$

$$|V_{b,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |507,68| < 809,69 \quad \text{verified} \quad (0,63)$$

Verification of a plate weakened by openings

$A_t = 22,50$ [cm²] Area of tension zone of the gross section

$A_{t,net} = 16,50$ [cm²] Net area of the section in tension

$A_t = 22,50$ [cm²] Area of tension zone of the gross section

$$0.9 \cdot (A_{t,net}/A_t) \geq (f_y \cdot \gamma_{M2}) / (f_u \cdot \gamma_{M0}) \quad 0,66 < 0,94$$

$W_{net} = 212,16$ [cm³] Elastic section modulus

$M_{c,Rdnet} = 75,32$ [kN*m] Design resistance of the section for bending

$$M_{c,Rdnet} = W_{net} \cdot f_{yp} / \gamma_{M0}$$

$$|M_0| \leq M_{c,Rdnet} \quad |23,54| < 75,32 \quad \text{verified} \quad (0,31)$$

$A_v = 45,00$ [cm²] Effective section area for shear

$$A_v = h_p \cdot t_p$$

$A_{v,net} = 33,00$ [cm²] Net area of a section effective for shear

$$A_{v,net} = A_v - n_v \cdot d_0$$

$V_{pl,Rd} = 676,37$ [kN] Design plastic resistance for shear

$$V_{pl,Rd} = (A_{v,net} \cdot f_y) / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})$$

$$|0.5 \cdot V_{b,Ed}| \leq V_{pl,Rd} \quad |253,84| < 676,37 \quad \text{verified} \quad (0,38)$$

Verification of a beam section weakened by openings

$A_t = 29,40$ [cm²] Area of tension zone of the gross section

$A_{t,net} = 22,20$ [cm²] Net area of the section in tension

$$0.9 \cdot (A_{t,net}/A_t) \geq (f_y \cdot \gamma_{M2}) / (f_u \cdot \gamma_{M0}) \quad 0,68 < 0,94$$

$W_{net} = 445,01$ [cm³] Elastic section modulus

$M_{c,Rdnet} = 157,98$ [kN*m] Design resistance of the section for bending

$$M_{c,Rdnet} = W_{net} \cdot f_{yp} / \gamma_{M0}$$

$$|M_0| \leq M_{c,Rdnet} \quad |47,09| < 157,98 \quad \text{verified} \quad (0,30)$$

$A_v = 58,80$ [cm²] Effective section area for shear

$A_{v,net} = 49,20$ [cm²] Net area of a section effective for shear

$$A_{v,net} = A_v - n_v \cdot d_0$$

$V_{pl,Rd} = \frac{1205,1}{6}$ [kN] Design plastic resistance for shear

$$V_{pl,Rd} = (A_v \cdot f_y) / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})$$

$$V_{b,Ed} \leq V_{pl,Rd} \quad |507,68| < 1205,16 \quad \text{verified} \quad (0,42)$$

Weld resistance

Butt weld connecting plate with column

$A_w = 30,00$ [cm²] Area of welds

$\sigma_N = 0,00$ [MPa] Stress from axial force

$$\sigma_N = 0.5 \cdot N_{b,Ed} / A_s$$

$\sigma_M = 139,61$ [MPa] Stress due to bending

$$\sigma_M = 0.5 \cdot M_0 / W_{ys}$$

$\sigma = 139,61$ [MPa] Maximum normal stress

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M$$

$\tau = 84,61$ [MPa] Tangent stress

$$\tau = 0.5 \cdot V_{b,Ed} / A_s$$

$\beta_w = 0,90$ Correlation coefficient

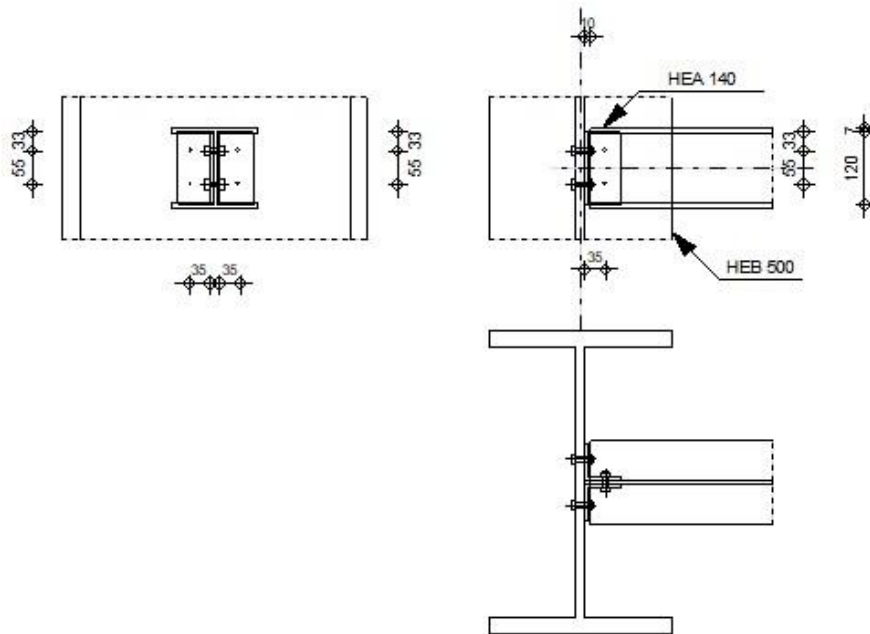
[Table 4.1]

$$\sqrt{[\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2]} \leq f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) \quad 202,41 < 417,78 \quad \text{verified} \quad (0,48)$$

Connection conforms to the code

Ratio 0,76

B2 Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια εσωτερική δοκό κατά Y



Σχήμα Β-2: Σύνδεση υποστυλώματος με κύρια δοκό κατά Y

General

Connection no.: 2
 Connection name: Beam-column (flange)
 Structure node: 636
 Structure bars: 725, 1509

Geometry

Column

Section: HEB 500
 Bar no.: 725
 $\alpha = -90,0$ [Deg] Inclination angle
 $h_c = 500$ [mm] Height of column section
 $b_{fc} = 300$ [mm] Width of column section
 $t_{wc} = 15$ [mm] Thickness of the web of column section
 $t_{fc} = 28$ [mm] Thickness of the flange of column section
 $r_c = 27$ [mm] Radius of column section fillet
 $A_c = 238,64$ [cm²] Cross-sectional area of a column
 $I_{yc} = 107176,00$ [cm⁴] Moment of inertia of the column section

Material: S 355
 $f_{yc} = 355,00$ [MPa] Design resistance
 $f_{uc} = 470,00$ [MPa] Tensile resistance

Beam

Section: HEA 140
 Bar no.: 1509
 $\alpha = 0,0$ [Deg] Inclination angle
 $h_b = 133$ [mm] Height of beam section
 $b_b = 140$ [mm] Width of beam section
 $t_{wb} = 6$ [mm] Thickness of the web of beam section
 $t_{fb} = 9$ [mm] Thickness of the flange of beam section
 $r_b = 12$ [mm] Radius of beam section fillet
 $A_b = 31,42$ [cm²] Cross-sectional area of a beam
 $I_{yb} = 1033,13$ [cm⁴] Moment of inertia of the beam section
 Material: S 355
 $f_{yb} = 355,00$ [MPa] Design resistance
 $f_{ub} = 470,00$ [MPa] Tensile resistance

Angle

Section: CAE 60x5
 $h_k = 60$ [mm] Height of angle section
 $b_k = 60$ [mm] Width of angle section
 $t_{fk} = 5$ [mm] Thickness of the flange of angle section
 $r_k = 8$ [mm] Fillet radius of the web of angle section
 $l_k = 120$ [mm] Angle length
 Material: S 355
 $f_{yk} = 355,00$ [MPa] Design resistance
 $f_{uk} = 470,00$ [MPa] Tensile resistance

Bolts

Bolts connecting column with angle

The shear plane passes through the UNTHREADED portion of the bolt.

Class = 8.8 Bolt class
 $d = 8$ [mm] Bolt diameter

Class =	8.8	Bolt class
$d_0 =$	9 [mm]	Bolt opening diameter
$A_s =$	0,37 [cm ²]	Effective section area of a bolt
$A_v =$	0,50 [cm ²]	Area of bolt section
$f_{ub} =$	800,00 [MPa]	Tensile resistance
$k =$	1	Number of bolt columns
$w =$	2	Number of bolt rows
$e_1 =$	33 [mm]	Level of first bolt
$p_1 =$	55 [mm]	Vertical spacing

Bolts connecting angle with beam

The shear plane passes through the UNTHREADED portion of the bolt.

Class =	8.8	Bolt class
$d =$	8 [mm]	Bolt diameter
$d_0 =$	9 [mm]	Bolt opening diameter
$A_s =$	0,37 [cm ²]	Effective section area of a bolt
$A_v =$	0,50 [cm ²]	Area of bolt section
$f_{ub} =$	800,00 [MPa]	Tensile resistance
$k =$	1	Number of bolt columns
$w =$	2	Number of bolt rows
$e_1 =$	33 [mm]	Level of first bolt
$p_1 =$	55 [mm]	Vertical spacing

Material factors

$\gamma_{M0} =$	1,00	Partial safety factor
$\gamma_{M2} =$	1,25	Partial safety factor

Loads

Case: 71: ULS35 (1+2+3+4+5+6+7+8) * 1.35 + (15+34) * 1.50

$N_{b,Ed} =$	0,00 [kN]	Axial force
$V_{b,Ed} =$	1,47 [kN]	Shear force
$M_{b,Ed} =$	-0,00 [kN*m]	Bending moment

Results

Bolts connecting column with angle

Bolt capacities

$$F_{v,Rd} = \frac{19,3}{0} \text{ [kN]} \quad \text{Shear bolt resistance in the unthreaded portion of a bolt} \quad F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{21,0}{8} \text{ [kN]} \quad \text{Tensile resistance of a single bolt} \quad F_{t,Rd} = 0.9 \cdot f_u \cdot A_s / \gamma_{M2}$$

Bolt bearing on the column web

Direction x

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 1,00 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bx} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd1x} = 109,04 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_M$$

Direction z

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd1z} = 109,04 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Bolt bearing on the angle

Direction x

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 0,93 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bx} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,93 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2x} = 34,81 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_M$$

Direction z

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2z} = 37,6 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t_i / \gamma_{M2}$$

Forces acting on bolts in the column - angle connection

Bolt shear

$$e = 38 \text{ [mm]} \quad \text{Distance between centroid of a bolt group of an angle and center of the beam web}$$

$$M_0 = 0,03 \text{ [kN*m]} \quad \text{Real bending moment} \quad M_0 = 0.5 \cdot V_{b,Ed} \cdot e$$

$$F_{Vz} = 0,37 \text{ [kN]} \quad \text{Component force in a bolt due to influence of the shear force} \quad F_{Vz} = 0.5 \cdot |V_{b,Ed}| / n$$

$$F_{Mx} = 0,50 \text{ [kN]} \quad \text{Component force in a bolt due to influence of the moment} \quad F_{Mx} = |M_0| \cdot z_i / \sum z_i^2$$

$$F_{x,Ed} = 0,50 \text{ [kN]} \quad \text{Design total force in a bolt on the direction x} \quad F_{x,Ed} = F_{Nx} + F_{Mx}$$

$$F_{z,Ed} = 0,37 \text{ [kN]} \quad \text{Design total force in a bolt on the direction z} \quad F_{z,Ed} = F_{Vz} + F_{Mz}$$

$$F_{Ed} = 0,62 \text{ [kN]} \quad \text{Resultant shear force in a bolt} \quad F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$$

$$F_{Rdx} = 34,8 \text{ [kN]} \quad \text{Effective design capacity of a bolt on the direction x} \quad F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = 37,6 \text{ [kN]} \quad \text{Effective design capacity of a bolt on the direction z} \quad F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad 0,50 < 34,81 \quad \text{verified} \quad (0,01)$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad 0,37 < 37,60 \quad \text{verified} \quad (0,01)$$

$$F_{Ed} \leq F_{v,Rd} \quad 0,62 < 19,30 \quad \text{verified} \quad (0,03)$$

Bolt tension

$$e = 42 \text{ [mm]} \quad \text{Distance between centroid of a bolt group and center of column web}$$

$$M_{0t} = 0,0 \text{ [kN*m]} \quad \text{Real bending moment} \quad M_{0t} = 0.5 \cdot V_{b,Ed} \cdot e$$

$$F_{t,Ed} = 0,5 \text{ [kN]} \quad \text{Tensile force in the outermost bolt} \quad F_{t,Ed} = M_{0t} \cdot z_{max} / \sum z_i^2 + 0.5 \cdot N_{b2,Ed} / n$$

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad 0,56 < 21,08 \quad \text{verified} \quad (0,03)$$

Simultaneous action of a tensile force and a shear force in a bolt

$$F_{v,Ed} = 0,62 \text{ [kN]} \quad \text{Resultant shear force in a bolt} \quad F_{v,Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$$

$$F_{v,Ed} / F_{v,Rd} + F_{t,Ed} / (1.4 \cdot F_{t,Rd}) \leq 1.0 \quad 0,05 < 1,00 \quad \text{verified} \quad (0,05)$$

Bolts connecting angle with beam

Bolt capacities

$$F_{v,Rd} = \frac{38,6}{0} \text{ [kN]} \quad \text{Shear bolt resistance in the unthreaded portion of a bolt} \quad F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_v \cdot m / \gamma_{M2}$$

Bolt bearing on the beam

Direction x

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 0,93 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bx} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,93 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd1x} = 38,30 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d^* \cdot t_i / \gamma_M$$

Direction z

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd1z} = 41,36 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d^* \cdot t_i / \gamma_M$$

Bolt bearing on the angle

Direction x

$$k_{1x} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1x} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bx} = 0,93 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bx} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bx} > 0.0 \quad 0,93 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2x} = 69,63 \text{ [kN]} \quad \text{Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d^* \cdot t_i / \gamma_M$$

Direction z

$$k_{1z} = 2,50 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$$

$$k_{1z} > 0.0 \quad 2,50 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$\alpha_{bz} = 1,00 \quad \text{Coefficient for calculation of } F_{b,Rd} \quad \alpha_{bz} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$$

$$\alpha_{bz} > 0.0 \quad 1,00 > 0,00 \quad \text{verified}$$

$$F_{b,Rd2z} = 75,2 \text{ [kN]} \text{ Bearing resistance of a single bolt} \quad F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

Forces acting on bolts in the angle - beam connection

Bolt shear

$$e = 42 \text{ [mm]} \text{ Distance between centroid of a bolt group and center of column web}$$

$$M_0 = 0,06 \text{ [kN*m]} \text{ Real bending moment} \quad M_0 = M_{b,Ed} + V_{b,Ed} \cdot e$$

$$F_{Vz} = 0,73 \text{ [kN]} \text{ Component force in a bolt due to influence of the shear force} \quad F_{Vz} = |V_{b,Ed}| / n$$

$$F_{Mx} = 1,13 \text{ [kN]} \text{ Component force in a bolt due to influence of the moment} \quad F_{Mx} = |M_0| \cdot z_i / \sum z_i^2$$

$$F_{x,Ed} = 1,13 \text{ [kN]} \text{ Design total force in a bolt on the direction x} \quad F_{x,Ed} = F_{Nx} + F_{Mx}$$

$$F_{z,Ed} = 0,73 \text{ [kN]} \text{ Design total force in a bolt on the direction z} \quad F_{z,Ed} = F_{Vz} + F_{Mz}$$

$$F_{Ed} = 1,35 \text{ [kN]} \text{ Resultant shear force in a bolt} \quad F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$$

$$F_{Rdx} = 38,30 \text{ [kN]} \text{ Effective design capacity of a bolt on the direction x} \quad F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$$

$$F_{Rdz} = 41,36 \text{ [kN]} \text{ Effective design capacity of a bolt on the direction z} \quad F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$$

$$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx} \quad |1,13| < 38,30 \quad \text{verified} \quad (0,03)$$

$$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz} \quad |0,73| < 41,36 \quad \text{verified} \quad (0,02)$$

$$F_{Ed} \leq F_{v,Rd} \quad 1,35 < 38,60 \quad \text{verified} \quad (0,03)$$

Verification of the section due to block tearing (shear force)

Angle

$$A_{nt} = 1,02 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ Net area of the section in tension}$$

$$A_{nv} = 3,70 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ Area of the section in shear}$$

$$V_{effRd} = 95,10 \text{ [kN]} \text{ Design capacity of a section weakened by openings} \quad V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|0.5 \cdot V_{b,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |0,73| < 95,10 \quad \text{verified} \quad (0,01)$$

Beam

$$A_{nt} = 1,13 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ Net area of the section in tension}$$

$$A_{nv} = 4,43 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ Area of the section in shear}$$

$$V_{effRd} = 111,94 \text{ [kN]} \text{ Design capacity of a section weakened by openings} \quad V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$|V_{b,Ed}| \leq V_{effRd} \quad |1,47| < 111,94 \quad \text{verified} \quad (0,01)$$

Verification of angle section weakened by openings

$A_t = 3,00$ [cm²] Area of tension zone of the gross section

$A_{t,net} = 2,55$ [cm²] Net area of the section in tension

$$0.9 \cdot (A_{t,net}/A_t) \geq (f_y \cdot \gamma_{M2}) / (f_u \cdot \gamma_{M0}) \quad 0,77 < 0,94$$

$W_{net} = 11,82$ [cm³] Elastic section modulus

$M_{c,Rdnet} = 4,20$ [kN*m] Design resistance of the section for bending

$$M_{c,Rdnet} = W_{net} \cdot f_{yp} / \gamma_{M0}$$

$$|M_0| \leq M_{c,Rdnet} \quad |0,03| < 4,20 \quad \text{verified} \quad (0,01)$$

$A_v = 6,00$ [cm²] Effective section area for shear

$$A_v = I_a \cdot t_{ia}$$

$A_{v,net} = 5,10$ [cm²] Net area of a section effective for shear

$$A_{v,net} = A_v - n_v \cdot d_0$$

$V_{pl,Rd} = 122,98$ [kN] Design plastic resistance for shear

$$V_{pl,Rd} = (A_v \cdot f_y) / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})$$

$$|0.5 \cdot V_{b,Ed}| \leq V_{pl,Rd} \quad |0,73| < 122,98 \quad \text{verified} \quad (0,01)$$

Verification of a beam section weakened by openings

$A_t = 3,66$ [cm²] Area of tension zone of the gross section

$A_{t,net} = 3,16$ [cm²] Net area of the section in tension

$$0.9 \cdot (A_{t,net}/A_t) \geq (f_y \cdot \gamma_{M2}) / (f_u \cdot \gamma_{M0}) \quad 0,78 < 0,94$$

$W_{net} = 15,88$ [cm³] Elastic section modulus

$M_{c,Rdnet} = 5,64$ [kN*m] Design resistance of the section for bending

$$M_{c,Rdnet} = W_{net} \cdot f_{yp} / \gamma_{M0}$$

$$|M_0| \leq M_{c,Rdnet} \quad |0,06| < 5,64 \quad \text{verified} \quad (0,01)$$

$A_v = 7,31$ [cm²] Effective section area for shear

$A_{v,net} = 6,32$ [cm²] Net area of a section effective for shear

$$A_{v,net} = A_v - n_v \cdot d_0$$

$V_{pl,Rd} = 149,93$ [kN] Design plastic resistance for shear

$$V_{pl,Rd} = (A_v \cdot f_y) / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})$$

$$V_{b,Ed} \leq V_{pl,Rd} \quad |1,47| < 149,93 \quad \text{verified} \quad (0,01)$$

Remarks

Distance between angle horizontal edge and beam top flange is too small -2 [mm] < 12 [mm]

Distance between angle horizontal edge and beam bottom flange is too small -2 [mm] < 12 [mm]

Connection conforms to the code Ratio 0,05