



«Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο»

«Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός»

Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία

«Η χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης για τη βιώσιμη σχεδίαση
σχολικών κτιρίων και αυλών: ευκαιρίες, κίνδυνοι και προτάσεις»

«Λεμονιά Τσιλιμπώκου»

Επιβλέπων καθηγητής/Επιβλέπουσα καθηγήτρια: «Σοφία Γιάνναρου»

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Η χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης για τη βιώσιμη σχεδίαση
σχολικών κτιρίων και αυλών: ευκαιρίες, κίνδυνοι και προτάσεις»

«Λεμονιά Τσιλιμπώκου»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής/Επιβλέπουσα
Καθηγήτρια:

«Γιάνναρου Σοφία»

«Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια
ΣΕΠ ΕΑΠ»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής/Συν-
Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

«Ραψομανίκης Νικόλαος»

«Υποψήφιος Διδάκτορας ΣΕΠ ΕΑΠ»

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη δυνατότητα αξιοποίησης εργαλείων παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης ως μέσων υποστήριξης της προκαταρκτικής λήψης αποφάσεων για τον βιώσιμο και βιοκλιματικό επανασχεδιασμό σχολικών κτιρίων. Το θεωρητικό μέρος εξετάζει τις αρχές της βιώσιμης σχολικής αρχιτεκτονικής, την ποιότητα του εσωτερικού και υπαίθριου περιβάλλοντος, τη μικροκλιματική και παιδαγωγική λειτουργία των σχολικών αυλών, καθώς και τις εφαρμογές, τους περιορισμούς και τις ηθικές διαστάσεις της Τεχνητής Νοημοσύνης στον αρχιτεκτονικό και κατασκευαστικό κλάδο.

Το ερευνητικό μέρος οργανώθηκε ως συγκριτική μελέτη περίπτωσης με αντικείμενο τη νότια ζώνη του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου. Στο ChatGPT και στο Gemini χορηγήθηκε κοινό πληροφοριακό πακέτο, το οποίο περιλάμβανε αρχιτεκτονικά σχέδια, φωτογραφίες, τεχνικές περιγραφές και στοιχεία της υφιστάμενης κατάστασης. Κάθε εργαλείο κλήθηκε να αναλύσει το πρόβλημα και να διαμορφώσει δύο σενάρια: ένα ελάχιστης και άμεσα εφαρμόσιμης παρέμβασης και ένα ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης. Τα τέσσερα σενάρια αξιολογήθηκαν ως προς την αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού, τη βιοκλιματική καταλληλότητα, την τεχνική εφαρμοσιμότητα, την αρχιτεκτονική συμβατότητα και την τεκμηρίωση και αναγνώριση των περιορισμών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και τα δύο μοντέλα εντόπισαν κοινά πεδία παρέμβασης, όπως η ηλιοπροστασία, ο αερισμός, τα κουφώματα, η ενεργητική ψύξη και το μικροκλίμα της αυλής. Το ChatGPT παρουσίασε περισσότερο σταδιακή και επιφυλακτική προσέγγιση, με συστηματικότερη διάκριση μεταξύ δεδομένων και υποθέσεων, ενώ το Gemini παρήγαγε πιο συγκεκριμένες και εύκολα οπτικοποιήσιμες προτάσεις, οι οποίες όμως εξαρτώνταν περισσότερο από μη επιβεβαιωμένες παραδοχές. Οι συνολικές βαθμολογίες ήταν 23/25 και 22/25 για τα δύο σενάρια του ChatGPT και 19/25 και 17/25 για τα αντίστοιχα σενάρια του Gemini.

Συμπερασματικά, η παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί να επιταχύνει την οργάνωση του σχεδιαστικού προβλήματος, να διευρύνει το πεδίο των εναλλακτικών λύσεων και να υποστηρίξει τον προγραμματισμό περαιτέρω ελέγχων. Δεν μπορεί, ωστόσο, να υποκαταστήσει την αυτοψία, τις μετρήσεις, τις προσομοιώσεις και την τελική κρίση των αρμόδιων επαγγελματιών.

Λέξεις-κλειδιά: Τεχνητή Νοημοσύνη, βιώσιμος σχεδιασμός, σχολικά κτίρια, βιοκλιματική αναβάθμιση, μεγάλα γλωσσικά μοντέλα, μελέτη περίπτωσης

«The Use of Artificial Intelligence for the Sustainable Design of School Buildings and Schoolyards: Opportunities, Challenges, and Recommendations»

«Lemonia Tsilimpokou»

Abstract

This thesis investigates the potential use of generative Artificial Intelligence tools to support preliminary decision-making in the sustainable and bioclimatic redesign of school buildings. The theoretical part examines the principles of sustainable school architecture, the quality of indoor and outdoor environments, the microclimatic and educational role of schoolyards, and the applications, limitations, and ethical dimensions of Artificial Intelligence in architecture, engineering, and construction.

The empirical part was structured as a comparative case study focusing on the southern zone of the Papastrateio Primary School in Agrinio, Greece. ChatGPT and Gemini received the same information package, including architectural drawings, photographs, technical descriptions, and information on the existing condition of the building. Each tool was asked to analyze the problem and develop two scenarios: a minimum and readily applicable intervention scenario and a comprehensive bioclimatic upgrading scenario. The four scenarios were assessed according to five criteria: use of the available information, bioclimatic suitability, technical feasibility, architectural compatibility, and documentation and recognition of limitations.

The findings showed that both models identified common areas of intervention, including solar protection, ventilation, window systems, active cooling, and the schoolyard microclimate. ChatGPT adopted a more gradual and cautious approach and distinguished more systematically between documented information and assumptions. Gemini generated more specific and readily visualized proposals, but these depended to a greater extent on unverified assumptions. The two ChatGPT scenarios received overall scores of 23/25 and 22/25, while the corresponding Gemini scenarios received 19/25 and 17/25.

The study concludes that generative Artificial Intelligence can accelerate the initial organisation of a design problem, broaden the range of alternatives considered, and help define the inspections, measurements, and specialized studies required at later stages. However, it cannot replace on-site investigation, environmental and energy measurements, simulation, or the professional judgement

of architects, engineers, and other specialists. Its responsible use therefore requires clearly structured input data, a transparent evaluation protocol, explicit recognition of uncertainty, and continuous human oversight.

Keywords: Artificial Intelligence, sustainable design, school buildings, bioclimatic upgrading, large language models, case study

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Περιεχόμενα	4
Κατάλογος Πινάκων	7
Κατάλογος Εικόνων	8
Συντομογραφίες	9
Σημαντικότερα σημεία	13
Συνεισφορά της εργασίας	14
1. Εισαγωγή.....	24
1.1 Θεματικό πλαίσιο και σημασία του θέματος	24
1.2 Η Τεχνητή Νοημοσύνη στην αρχιτεκτονική και στον κατασκευαστικό τομέα.....	26
1.3 Σκοπός, ερευνητικά ερωτήματα και στόχοι της εργασίας	30
1.4 Αντικείμενο και πεδίο της μελέτης	33
1.5 Συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογικής προσέγγισης	37
1.6 Δομή της διπλωματικής εργασίας	39
2. Βιωσιμότητα, σχολική αρχιτεκτονική και εκπαιδευτικά περιβάλλοντα	44
2.1 Θεωρητικές προσεγγίσεις της βιωσιμότητας στα κτίρια	44
2.2 Αρχές βιώσιμης αρχιτεκτονικής και βιοκλιματικού σχεδιασμού	48
2.3 Βιώσιμα σχολικά κτίρια	52
2.3.1 Το κίνημα των «πράσινων σχολείων» και οι διεθνείς κατευθύνσεις.....	53
2.3.2 Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος και μάθηση	54
2.3.3 Βιώσιμα σχολικά κτίρια ως εκπαιδευτικοί και κοινωνικοί πόροι.....	55
2.4 Σχολικές αυλές και υπαίθριοι παιδαγωγικοί χώροι.....	60
2.4.1 Η σχολική αυλή ως μικροκλιματικός χώρος.....	61
2.4.2 Η σχολική αυλή ως κοινωνικός και κοινοτικός χώρος.....	62
2.4.3 Υπαίθριοι παιδαγωγικοί χώροι και μάθηση έξω από την τάξη.....	62
2.4.4 Βιοφιλικός σχεδιασμός σχολικών αυλών	63
2.4.5 Ασφάλεια, ένταξη και προσβασιμότητα: προς μια «συμπεριληπτική» σχολική αυλή.....	65
2.5 Κριτήρια αξιολόγησης της βιωσιμότητας σχολικών κτιρίων και αυλών.....	66
2.5.1 Περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια	67
2.5.2 Μικροκλιματικά κριτήρια και θερμική άνεση στις αυλές	69
2.5.3 Λειτουργικά και χωρικά κριτήρια.....	71
2.5.4 Κοινωνικά και παιδαγωγικά κριτήρια.....	73
2.5.5 Προς ένα συνθετικό πλαίσιο αξιολόγησης για την παρούσα εργασία.....	75
3. Τεχνητή Νοημοσύνη στον τομέα του δομημένου περιβάλλοντος.....	77
3.1 Βασικές κατηγορίες και αρχές λειτουργίας της ΤΝ.....	77
3.1.1 Μηχανική μάθηση, βαθιά μάθηση και βασικές μορφές «μάθησης»	77
3.1.2 Παραγωγικά μοντέλα, «μοντέλα βάσης» και μεγάλα γλωσσικά μοντέλα στον AECO	78
3.2 Εφαρμογές ΤΝ στον κύκλο ζωής του κτιρίου	79
3.2.1 Στάδιο σχεδιασμού: από «έλεγχο απόδοσης» σε performance-driven παραγωγή λύσεων	80
3.2.2 Στάδιο κατασκευής: πρόβλεψη, έλεγχος, αυτοματοποίηση ροών και μείωση σπατάλης	81
3.2.3 Στάδιο λειτουργίας/συντήρησης: ενεργειακή βελτιστοποίηση, ανίχνευση ανωμαλιών και ψηφιακά δίδυμα	82
3.3 Τεχνητή Νοημοσύνη, BIM και βιώσιμος σχεδιασμός	83
3.4 Generativedesign και υπολογιστική διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων	86

3.4.1 Λογική βελτιστοποίησης και βασικός αγωγός εργασίας (workflow)	87
3.4.2 Εργαλειοθήκη, αλγόριθμοι και «επιτάχυνση» του υπολογιστικού κόστους	88
3.4.3 Εστίαση στη βιωσιμότητα: τι βελτιστοποιείται και τι τεκμηριώνεται.....	89
3.5 Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (LLMs) στην αρχιτεκτονική πρακτική και στη διαχείριση πληροφορίας έργου	90
3.5.1 Μεγάλα γλωσσικά μοντέλα και πολυτροπική επεξεργασία	90
3.5.2 Εφαρμογές στη διαχείριση πληροφορίας και στην αρχιτεκτονική πρακτική	91
3.5.3 Παραγωγή προκαταρκτικών σχεδιαστικών σεναρίων	93
3.5.4 Διατύπωση οδηγιών, αναπαραγωγιμότητα και έλεγχος αξιοπιστίας	95
4. Ηθικές, νομικές και κοινωνικές διαστάσεις της ΤΝ στην αρχιτεκτονική και στις κατασκευές.....	98
4.1 Πλαίσιο «υπεύθυνης» ή «αξιόπιστης» Τεχνητής Νοημοσύνης.....	98
4.2 Ηθικά ζητήματα από την ενσωμάτωση της ΤΝ στον κλάδο ΑΕΚ	101
4.3 Νομικές και δεοντολογικές διαστάσεις στη λήψη αποφάσεων για κτίρια.....	104
4.4 Κοινωνική βιωσιμότητα, εκπαιδευτικά περιβάλλοντα και ΤΝ.....	108
5. Μεθοδολογία της έρευνας.....	111
5.1 Ερευνητική προσέγγιση, σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα	111
5.2 Επιλογή και οριοθέτηση της μελέτης περίπτωσης.....	113
5.2.1 Χαρακτηριστικά της επιλεγμένης μελέτης περίπτωσης	114
5.2.2 Επιλογή της νότιας ζώνης	115
5.2.3 Χωρικά και τεχνικά όρια της διερεύνησης	117
5.3 Ερευνητικό υλικό και εργαλεία Τεχνητής Νοημοσύνης.....	118
5.3.1 Ερευνητικό υλικό.....	118
5.3.2 Επιλογή των εργαλείων ΤΝ.....	119
5.3.3 Κοινές συνθήκες χρήσης.....	120
5.4 Διαδικασία αποτύπωσης και ανάλυσης της υφιστάμενης κατάστασης	120
5.5 Διαδικασία παραγωγής των εναλλακτικών σεναρίων	123
5.5.1 Δομή των prompts.....	123
5.5.2 Περιεχόμενο των σεναρίων.....	125
5.5.3 Καταγραφή των αποτελεσμάτων	125
5.6 Πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης των σεναρίων	125
5.6.1 Κριτήρια αξιολόγησης	126
5.6.2 Κλίμακα βαθμολόγησης.....	127
5.6.3 Αξιολόγηση των επιμέρους παρεμβάσεων	127
5.6.4 Συγκριτική παρουσίαση	128
5.7 Εγκυρότητα, αξιοπιστία και περιορισμοί της έρευνας.....	128
6. Παρουσίαση και συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων	130
6.1 Εφαρμογή του ερευνητικού πρωτοκόλλου	130
6.2 Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης από τα δύο μοντέλα	132
6.3 Παρουσίαση των σεναρίων του ChatGPT	139
6.3.1 Σενάριο C2A: Ελάχιστη και άμεσα εφαρμόσιμη παρέμβαση	140
6.3.2 Σενάριο C2B: Ολοκληρωμένη βιοκλιματική αναβάθμιση	142
6.3.3 Διαφοροποίηση των δύο σεναρίων	145
6.4 Παρουσίαση των σεναρίων του Gemini	145
6.4.1 Σενάριο G2A: Ελάχιστη και άμεσα εφαρμόσιμη παρέμβαση	146
6.4.2 Σενάριο G2B: Ολοκληρωμένη βιοκλιματική αναβάθμιση	148
6.4.3 Διαφοροποίηση των δύο σεναρίων	150
6.5 Συγκριτική ανάλυση των προτεινόμενων παρεμβάσεων.....	151
6.5.1 Κοινά σημεία των τεσσάρων σεναρίων	153
6.5.2 Σύγκριση των σεναρίων ελάχιστης παρέμβασης	153

6.5.3 Σύγκριση των ολοκληρωμένων σεναρίων	154
6.5.4 Διαφοροποίηση ως προς τον αύλειο χώρο.....	156
6.5.5 Χρήση των διαθέσιμων δεδομένων και διαχείριση της αβεβαιότητας.....	156
6.5.6 Συνολική συγκριτική αποτίμηση	157
6.6 Αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων	158
6.6.1 Συγκεντρωτική βαθμολόγηση.....	159
6.6.2 Αξιολόγηση των επιμέρους παρεμβάσεων	164
6.6.3 Συνολική αποτίμηση της αξιολόγησης	166
6.7 Σύγκριση της ιεράρχησης και του κριτικού αυτοελέγχου των δύο μοντέλων.....	167
6.7.1 Ιεράρχηση των παρεμβάσεων	168
6.7.2 Αναγνώριση της τεχνικής αβεβαιότητας	169
6.7.3 Παρεμβάσεις κατάλληλες για άμεση διερεύνηση.....	170
6.7.4 Προτάσεις με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα.....	171
6.7.5 Επίδραση στην ιστορική φυσιογνωμία	172
6.7.6 Πρόσθετα δεδομένα που θα μπορούσαν να μεταβάλουν τις προτάσεις	172
6.7.7 Αναγνώριση μη επαρκώς υποστηριζόμενων συμπερασμάτων.....	173
6.7.8 Συνολική αποτίμηση του κριτικού αυτοελέγχου	174
7. Συζήτηση, συμπεράσματα και προτάσεις	175
7.1 Συζήτηση των αποτελεσμάτων	175
7.2 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα.....	180
7.2.1 Ποια εναλλακτικά σενάρια πρότεινα το ChatGPT και το Gemini για τη βιοκλιματική ανβάθμιση της νότιας ζώνης του Παπαστράτειου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου;.....	180
7.2.2 Σε ποιον βαθμό τα παραγόμενα σενάρια αξιοποίησαν ορθά το διαθέσιμο αρχιτεκτονικό, τεχνικό και κλιματικό υλικό και ανταποκρίθηκαν στις αρχές του βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού;	182
7.2.3 Ποιες ομοιότητες και διαφορές παρουσίασαν τα σενάρια του ChatGPT και του Gemini ως προς το είδος, την έκταση και την ιεράρχηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων;	183
7.2.4 Σε ποιον βαθμό τα τέσσερα σενάρια ανταποκρίθηκαν στα πέντε κριτήρια αξιολόγησης;.....	184
7.3 Συμπεράσματα	186
7.4 Περιορισμοί της έρευνας, αναπάντητα ερωτήματα και αδυναμίες της εργασίας... ..	187
7.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και πρακτική εφαρμογή.....	191
7.5.1 Διεύρυνση των μελετών περίπτωσης.....	191
7.5.2 Εξέταση περισσότερων μοντέλων και επαναλαμβανόμενων εκτελέσεων	192
7.5.3 Διερεύνηση της επίδρασης του prompting	193
7.5.4 Σύνδεση με μετρήσεις και ενεργειακές προσομοιώσεις.....	194
7.5.5 Σύνδεση των γλωσσικών μοντέλων με BIM και δομημένες πηγές	195
7.5.6 Αξιολόγηση από διεπιστημονική ομάδα ειδικών.....	196
7.5.7 Συμμετοχή των χρηστών του σχολείου.....	196
7.5.8 Πιλοτική εφαρμογή και αξιολόγηση πριν και μετά την παρέμβαση	197
7.5.9 Ενσωμάτωση κόστους, κύκλου ζωής και συντήρησης.....	198
7.5.10 Προτεινόμενο πλαίσιο πρακτικής αξιοποίησης	198
7.5.11 Επόμενα βήματα για το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο	199
8. Εφαρμογές.....	201
8.1 Θεωρητικές και πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων	201
Βιβλιογραφία.....	204
Παράρτημα.....	210
Κατόψεις - Όψεις	210
Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία	

Φωτογραφίες Κτιρίου	214
---------------------------	-----

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Κριτήρια αξιολόγησης.....	126
Πίνακας 2 Κλίμακα βαθμολόγησης.....	127
Πίνακας 3 Βασικά στοιχεία εφαρμογής του ερευνητικού πρωτοκόλλου	131
Πίνακας 4 Συγκριτική παρουσίαση της ανάλυσης της υφιστάμενης κατάστασης	135
Πίνακας 5 Παρεμβάσεις του ελάχιστου σεναρίου του ChatGPT	141
Πίνακας 6 Παρεμβάσεις του ολοκληρωμένου σεναρίου του ChatGPT	144
Πίνακας 7 Παρεμβάσεις του ελάχιστου σεναρίου του Gemini	147
Πίνακας 8 Παρεμβάσεις του ολοκληρωμένου σεναρίου του Gemini	149
Πίνακας 9 Συγκριτική αποτύπωση των βασικών πεδίων παρέμβασης.....	153
Πίνακας 10 Συγκεντρωτική αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων	159
Πίνακας 11 Κατάταξη των επιμέρους παρεμβάσεων	166
Πίνακας 12 Ιεράρχηση των παρεμβάσεων από τα δύο μοντέλα	169

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Κάτοψη πρώτου ορόφου	210
Εικόνα 2: Κάτοψη ισογείου	210
Εικόνα 3: Κάτοψη υπογείου	211
Εικόνα 4: Κάτοψη δώματος	211
Εικόνα 5: Νότια όψη	212
Εικόνα 6: Βορεινή όψη	212
Εικόνα 7: Δυτική όψη	212
Εικόνα 8: Ανατολική όψη	213
Εικόνα 9: Απεικόνιση κουφώματος	214
Εικόνα 10: Νότια όψη σχολείου	215
Εικόνα 11: Νότια όψη σχολείου και περιβάλλοντας χώρος	216
Εικόνα 12: Νότια όψη σχελίου και περιβάλλοντας χώρος	216
Εικόνα 13: Νότια όψη σχολείου	217
Εικόνα 14: Ανατολική πλευρά σχολείου και απεικόνιση κλιματισμού	218
Εικόνα 15: Περιβάλλοντας χώρος	219
Εικόνα 16: Απεικόνιση αερισμού αιθουσών	220

Συντομογραφίες

Συντομογραφία	Πλήρης ξενόγλωσση ονομασία	Ελληνική απόδοση ή επεξήγηση
AEC	Architecture, Engineering and Construction	Αρχιτεκτονική, Μηχανική και Κατασκευές
AECO	Architecture, Engineering, Construction and Operations	Αρχιτεκτονική, Μηχανική, Κατασκευές και Λειτουργία κτιρίων
AI	Artificial Intelligence	Τεχνητή Νοημοσύνη
AIHLEG	High-Level Expert Group on Artificial Intelligence	Ομάδα Εμπειρογνομόνων Υψηλού Επιπέδου για την Τεχνητή Νοημοσύνη
AIoT	Artificial Intelligence of Things	Συνδυασμός Τεχνητής Νοημοσύνης και Διαδικτύου των Πραγμάτων
ANN	Artificial Neural Network	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
API / APIs	Application Programming Interface / Interfaces	Διεπαφή / Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών
BB101	Building Bulletin 101	Βρετανικός οδηγός για τον αερισμό, τη θερμική άνεση και την ποιότητα του αέρα στα σχολικά κτίρια
BD+C	Building Design and Construction	Σχεδιασμός και Κατασκευή Κτιρίων, κατηγορία του συστήματος αξιολόγησης LEED
BIM	Building Information Modelling	Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου
BPIE	Buildings Performance Institute Europe	Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method	Μέθοδος περιβαλλοντικής αξιολόγησης κτιρίων του Building Research Establishment
CHPS	Collaborative for High Performance Schools	Οργανισμός/σύστημα προώθησης σχολικών κτιρίων υψηλής περιβαλλοντικής απόδοσης
CO ₂	Carbon Dioxide	Διοξείδιο του άνθρακα
DfE	Department for Education	Υπουργείο Παιδείας του Ηνωμένου Βασιλείου
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen	Γερμανικό Συμβούλιο Βιώσιμης Δόμησης
DL	Deep Learning	Βαθιά Μάθηση
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive	Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων
EPD	Environmental Product Declaration	Περιβαλλοντική Δήλωση

		Προϊόντος
EUI	Energy Use Intensity	Ένταση ενεργειακής χρήσης ή κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας
GDPR	General Data Protection Regulation	Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων
GlobalABC	Global Alliance for Buildings and Construction	Παγκόσμια Συμμαχία για τα Κτίρια και τις Κατασκευές
GP	Gaussian Process	Γκαουσιανή Διαδικασία, μέθοδος πιθανοτικής μοντελοποίησης και παλινδρόμησης
GPT	Generative Pre-trained Transformer	Παραγωγικός Προ εκπαιδευμένος Μετασχηματιστής
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning	Θέρμανση, Αερισμός και Κλιματισμός
IAQ	Indoor Air Quality	Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα
IEA	International Energy Agency	Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας
IEQ	Indoor Environmental Quality	Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος
IFC	Industry Foundation Classes	Ανοικτό πρότυπο ανταλλαγής και διαλειτουργικότητας δεδομένων BIM
ILCD	International Reference Life Cycle Data System	Διεθνές Σύστημα Αναφοράς Δεδομένων Κύκλου Ζωής
IoT	Internet of Things	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
ISO	International Organization for Standardization	Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
LCA	Life Cycle Assessment	Ανάλυση Κύκλου Ζωής
LCC	Life Cycle Costing	Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment	Αξιολόγηση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design	Σύστημα αξιολόγησης ενεργειακού και περιβαλλοντικού σχεδιασμού
LLM / LLMs	Large Language Model / Models	Μεγάλο Γλωσσικό Μοντέλο / Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα
LOD	Level of Detail	Επίπεδο Λεπτομέρειας ψηφιακού μοντέλου
ML	Machine Learning	Μηχανική Μάθηση
MOO	Multi-Objective Optimization	Πολυκριτηριακή ή πολυστοχική βελτιστοποίηση
NIST	National Institute of Standards and Technology	Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των ΗΠΑ
NLP	Natural Language Processing	Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II	Γενετικός αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης δεύτερης γενιάς
nZEB	nearly Zero-Energy Building	Κτίριο σχεδόν μηδενικής

		ενεργειακής κατανάλωσης
PDGD	Performance-Driven Generative Design	Παραγωγικός σχεδιασμός καθοδηγούμενος από την απόδοση
PET	Physiological Equivalent Temperature	Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία
PdM	Predictive Maintenance	Προγνωστική Συντήρηση
PIME'S	CONCERTO Communities Towards Optimal Thermal and Electrical Efficiency of Buildings and Districts, Based on Microgrids	Ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο για τη θερμική και ηλεκτρική ενεργειακή απόδοση κτιρίων και περιοχών με αξιοποίηση μικροδικτύων
REHVA	Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations	Ομοσπονδία Ευρωπαϊκών Ενώσεων Θέρμανσης, Αερισμού και Κλιματισμού
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century	Δίκτυο Πολιτικής για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας του 21ου αιώνα
RL	Reinforcement Learning	Ενισχυτική Μάθηση
SAHSB^PT	Sustainability Assessment of High School Buildings in Portugal	Μεθοδολογία αξιολόγησης της βιωσιμότητας σχολικών κτιρίων δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης στην Πορτογαλία
SBTool	Sustainable Building Tool	Εργαλείο αξιολόγησης της βιωσιμότητας κτιρίων
SDG / SDGs	Sustainable Development Goal / Goals	Στόχος / Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης
SPARQL	SPARQL Protocol and RDF Query Language	Γλώσσα ερωτημάτων για σημασιολογικά και διασυνδεδεμένα δεδομένα
SVR	Support Vector Regression	Παλινδρόμηση Διανυσμάτων Υποστήριξης
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization	Οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών για την Εκπαίδευση, την Επιστήμη και τον Πολιτισμό
UNICEF	United Nations Children's Fund	Ταμείο των Ηνωμένων Εθνών για τα Παιδιά
USGBC	U.S. Green Building Council	Συμβούλιο Πράσινων Κτιρίων των Ηνωμένων Πολιτειών
UTCI	Universal Thermal Climate Index	Παγκόσμιος Δείκτης Θερμικού Κλίματος
VOC	Volatile Organic Compounds	Πτητικές Οργανικές Ενώσεις
WCED	World Commission on Environment and Development	Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη
XGBoost	eXtreme Gradient Boosting	Αλγόριθμος ακραίας ενίσχυσης βαθμίδας

ZEB	Zero-Energy Building	Κτίριο μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης
ΑΠΕ	-	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
TN	-	Τεχνητή Νοημοσύνη

Σημαντικότερα σημεία

Η παραγωγική ΤΝ υποστηρίζει τον προκαταρκτικό βιώσιμο σχεδιασμό σχολικών κτιρίων.

Το ChatGPT διακρίνει συστηματικότερα τα δεδομένα από τις μη επιβεβαιωμένες υποθέσεις.

Το Gemini παράγει πιο συγκεκριμένες προτάσεις, αλλά στηρίζεται σε περισσότερες παραδοχές.

Σκίαση, αερισμός, ψύξη και μικροκλίμα αποτέλεσαν κοινά πεδία παρέμβασης.

Αυτοψία, μετρήσεις, προσομοιώσεις και ανθρώπινη κρίση παραμένουν απαραίτητες.

Συνεισφορά της εργασίας

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στη διερεύνηση της χρήσης εργαλείων παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης κατά τα προκαταρκτικά στάδια του βιώσιμου σχεδιασμού σχολικών κτιρίων. Ειδικότερα, εφαρμόζει το ChatGPT και το Gemini σε πραγματική μελέτη περίπτωσης, χρησιμοποιώντας κοινό αρχιτεκτονικό και τεχνικό πληροφοριακό υλικό και ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης. Με αυτόν τον τρόπο, αναδεικνύονται οι διαφοροποιήσεις των δύο εργαλείων ως προς την αξιοποίηση των δεδομένων, τη διατύπωση παρεμβάσεων, τη διαχείριση της αβεβαιότητας και την αναγνώριση των περιορισμών τους. Παράλληλα, η εργασία προτείνει μια διαφανή διαδικασία συγκριτικής αξιολόγησης, η οποία μπορεί να υποστηρίξει μελλοντικές εφαρμογές της παραγωγικής ΤΝ σε αντίστοιχα αρχιτεκτονικά προβλήματα. Η βασική συνεισφορά της εντοπίζεται στη διαμόρφωση ενός ρεαλιστικού πλαισίου συνεργασίας ανθρώπου και ΤΝ, στο οποίο οι προτάσεις των μοντέλων λειτουργούν ως προκαταρκτικό υλικό διερεύνησης και όχι ως υποκατάστατο της αυτοψίας, των μετρήσεων, των προσομοιώσεων και της επαγγελματικής κρίσης.

«Η χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης για τη βιώσιμη σχεδίαση σχολικών κτιρίων και αυλών: ευκαιρίες, κίνδυνοι και προτάσεις.»

Γιάνναρου Σοφία, Τσιλιμπώκου Λεμονιά, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

ΣΚΟΠΟΣ

Στόχος: Αξιολόγηση της ικανότητας των **ChatGPT** & **Gemini** να υποστηρίξουν την προκαταρκτική βιοκλιματική αναβάθμιση ιστορικών σχολικών κτιρίων.

Μελέτη Περίπτωσης: Η νότια ζώνη του Παπαστρατέιου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου.

Εστίαση: Συγκριτική αξιολόγηση των δύο μοντέλων υπό κοινές εισροές και οδηγίες (prompts).



Εικόνα 1: Η νότια όψη του Παπαστρατέιου Σχολείου. (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 2: Η νότια όψη του Παπαστρατέιου Σχολείου. (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Κοινό Πληροφοριακό Πακέτο: Χορηγήθηκαν τα ίδια αρχεία (αρχιτεκτονικά σχέδια, φωτογραφίες, τεχνικές περιγραφές, ιστορικά στοιχεία και κλιματικά δεδομένα Αγρινίου).

Διαδικασία 3 Σταδίων:

Στάδιο 1: Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης.

Στάδιο 2: Παραγωγή δύο σεναρίων από κάθε μοντέλο -ένα **σενάριο ελάχιστης παρέμβασης** (άμεσα εφαρμόσιμο) και ένα **σενάριο ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης**.

Στάδιο 3: Ιεράρχηση και κριτικός αυτοέλεγχος των προτάσεων (αναγνώριση σημείων που απαιτούν αυτοψία, μετρήσεις ή εξειδικευμένες μελέτες).

Πλαίσιο Αξιολόγησης (Κλίμακα 1-5):

- Αξιοποίηση διαθέσιμου υλικού
- Βιοκλιματική καταλληλότητα
- Τεχνική εφαρμολογικότητα
- Αρχιτεκτονική συμβατότητα (προστασία ιστορικής φυσιογνωμίας)
- Τεκμηρίωση & αναγνώριση περιορισμών

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύγκλιση: Και τα δύο μοντέλα εντόπισαν σωστά τους κύριους άξονες παρέμβασης (ηλιοπροστασία, φυσικός φωτισμός/αερισμός, προστασία λιθοδομής και ξύλινων κουφωμάτων, μικροκλίμα αυλής).

ChatGPT (Βαθμολογία: 23/25 στο Ελάχιστο & 22/25 στο Ολοκληρωμένο σενάριο):

- Ακολούθησε **σταδιακή, συντηρητική και επιφυλακτική προσέγγιση**.
- Διέκρινε συστηματικότερα τα επιβεβαιωμένα στοιχεία από τις υποθέσεις.
- Έδωσε έμφαση στη συντήρηση, τον έλεγχο και τις αναστρέψιμες παρεμβάσεις, περιορίζοντας τον τεχνικό και μορφολογικό κίνδυνο.

Gemini (Βαθμολογία: 19/25 στο Ελάχιστο & 17/25 στο Ολοκληρωμένο σενάριο):

- Παρήγαγε **πιο συγκεκριμένες, άμεσες και εύκολα οπτικοποιήσιμες λύσεις** (π.χ. νέα παντζούρια, αφαίρεση ασφάλτου, μεταφορά κλιματιστικών).
- Βασίστηκε συχνότερα σε **μη επιβεβαιωμένες παραδοχές** και παρουσίασε εκτιμήσεις με μεγαλύτερη βεβαιότητα από όση επέτρεπε το διαθέσιμο υλικό, αξιολογούμενο χαμηλότερα στην τεκμηρίωση και την αναγνώριση περιορισμών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ρόλος ΤΝ: Πολύτιμα εργαλεία για την **αρχική οργάνωση & ιδεοπαράγωγη** στα προκαταρκτικά στάδια σχεδιασμού.

Εξειδίκευση: Το ChatGPT υπερέρχει στη διαχείριση τεχνικού κινδύνου, ενώ το Gemini στην ταχεία παραγωγή οπτικών ιδεών.

Όρια: Η ΤΝ **δεν υποκαθιστά** την αυτοψία, τις περιβαλλοντικές μετρήσεις, τις προσομοιώσεις και την κρίση του μηχανικού.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ CHATGPT ΚΑΙ GEMINI ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΟΥ ΣΧΟΛΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Γιάνναρου Σοφία, Τσιλιμπώκου Λεμονιά

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,
Πρόγραμμα σπουδών “Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός”

Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

email: giannarou.sofia@ac.eap.gr, std166700@ac.eap.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα εξετάζει τη δυνατότητα του ChatGPT και του Gemini να υποστηρίξουν την προκαταρκτική διερεύνηση της βιοκλιματικής αναβάθμισης ιστορικού σχολικού κτιρίου. Ως μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε η νότια ζώνη του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου. Στα δύο πολυτροπικά μοντέλα δόθηκε κοινό πληροφοριακό πακέτο με αρχιτεκτονικά σχέδια, φωτογραφίες, τεχνικές περιγραφές και βασικά κλιματικά δεδομένα. Κάθε εργαλείο ανέλυσε την υφιστάμενη κατάσταση και παρήγαγε ένα σενάριο ελάχιστης παρέμβασης και ένα ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης. Τα σενάρια αξιολογήθηκαν ως προς την αξιοποίηση του υλικού, τη βιοκλιματική καταλληλότητα, την τεχνική εφαρμοσιμότητα, την αρχιτεκτονική συμβατότητα και την αναγνώριση περιορισμών. Και τα δύο μοντέλα εντόπισαν κοινούς άξονες παρέμβασης. Το ChatGPT ακολούθησε περισσότερο σταδιακή και επιφυλακτική προσέγγιση, ενώ το Gemini παρήγαγε πιο συγκεκριμένες και εύκολα οπτικοποιήσιμες λύσεις, οι οποίες βασίστηκαν συχνότερα σε μη επιβεβαιωμένες παραδοχές. Τα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να υποστηρίξουν την αρχική οργάνωση του σχεδιαστικού προβλήματος, χωρίς να υποκαθιστούν τις μετρήσεις, τις τεχνικές μελέτες και την επαγγελματική κρίση.

Λέξεις-κλειδιά: Τεχνητή Νοημοσύνη, βιοκλιματική αναβάθμιση, σχολικά κτίρια, μεγάλα γλωσσικά μοντέλα

ABSTRACT

This study examines the ability of ChatGPT and Gemini to support the preliminary stages of the bioclimatic upgrading of a historic school building. The southern zone of Papastrateio Primary School in Agrinio, Greece, was selected as the case study. Both multimodal models received the same information package, including architectural drawings, photographs, technical descriptions, and basic climate data. Each tool analyzed the existing condition and produced two alternatives: a minimum-intervention scenario and a comprehensive bioclimatic-upgrading scenario. The scenarios were assessed according to their use of the available information, bioclimatic suitability, technical feasibility, architectural compatibility, and recognition of limitations. Both models identified common intervention areas. ChatGPT adopted a more gradual and cautious approach, whereas Gemini produced more specific and readily visualized solutions that relied more frequently on unverified assumptions. It is indicated that large language models can support the initial organization of a design problem and the exploration of alternatives. However, they cannot replace environmental measurements, technical studies, simulation, or professional judgement.

Keywords: Artificial Intelligence, bioclimatic upgrading, school buildings, large language models

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σχολικά κτίρια αποτελούν μια ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία του δομημένου περιβάλλοντος, καθώς η ποιότητά τους συνδέεται άμεσα με την υγεία, την ευεξία και τις συνθήκες μάθησης των μαθητών. Ο φυσικός φωτισμός, ο αερισμός, η θερμοκρασία, η ποιότητα του εσωτερικού αέρα και η θερμική άνεση επηρεάζουν τη λειτουργία των εκπαιδευτικών χώρων και τη συνολική εμπειρία των χρηστών τους (Mendell & Heath, 2005; Toyinbo, 2023). Αντίστοιχα, οι σχολικές αυλές δεν αποτελούν απλώς χώρους διαλείμματος, αλλά τμήματα του εκπαιδευτικού και μικροκλιματικού περιβάλλοντος. Η σκίαση, η βλάστηση και η αναλογία σκληρών και φυτεμένων επιφανειών επηρεάζουν τη θερμική καταπόνηση των παιδιών και τη δυνατότητα ασφαλούς χρήσης των υπαίθριων χώρων κατά τις θερμότερες περιόδους (Antoniadis et al., 2020; Binabid et al., 2024).

Η βιώσιμη αναβάθμιση ενός σχολικού κτιρίου αποτελεί σύνθετο και πολυκριτηριακό πρόβλημα. Η ηλιοπροστασία, ο φυσικός φωτισμός, ο αερισμός, η ενεργειακή λειτουργία, η ασφάλεια και η δυνατότητα συντήρησης πρέπει να εξετάζονται συνδυαστικά, επειδή μια παρέμβαση σε έναν τομέα μπορεί να επηρεάζει θετικά ή αρνητικά κάποιον άλλο. Η δυσκολία αυξάνεται στα ιστορικά σχολικά κτίρια, όπου οι προτάσεις οφείλουν να συνδυάζουν τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης με τη διατήρηση της αρχιτεκτονικής φυσιογνωμίας, των υλικών, του ρυθμού των ανοιγμάτων και των χαρακτηριστικών στοιχείων του κελύφους.

Παράλληλα, η ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης έχει διευρύνει τις δυνατότητες επεξεργασίας τεχνικών δεδομένων και υποστήριξης της λήψης αποφάσεων στον κλάδο της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και των κατασκευών. Οι σχετικές εφαρμογές

περιλαμβάνουν την πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης, την ανάλυση τεχνικών κινδύνων, τη σύνθεση πληροφοριών και την παραγωγή εναλλακτικών σχεδιαστικών κατευθύνσεων (Adewale et al., 2024; Debrah et al., 2022; Pan & Zhang, 2021). Τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν επιπλέον να επεξεργάζονται κείμενα, εικόνες, σχέδια και συνοδευτικά αρχεία μέσω φυσικογλωσσικών οδηγιών. Η γλωσσική τους ευχέρεια, ωστόσο, δεν εξασφαλίζει την τεχνική εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Είναι δυνατόν να διατυπώσουν πειστικές αλλά μη επαρκώς τεκμηριωμένες προτάσεις, να υιοθετήσουν μη επιβεβαιωμένες παραδοχές ή να μην αναγνωρίσουν όλους τους αναγκαίους ελέγχους. Για τον λόγο αυτό, η παραγωγική ΤΝ πρέπει να αντιμετωπίζεται ως εργαλείο προκαταρκτικής υποστήριξης και όχι ως υποκατάστατο της αυτοψίας, των μετρήσεων και της επαγγελματικής κρίσης (Huang et al., 2023; Tonmoy et al., 2024).

Παρότι η χρήση της ΤΝ στα βιώσιμα κτίρια έχει μελετηθεί κυρίως σε σχέση με την ενεργειακή πρόβλεψη, τη βελτιστοποίηση και τη λειτουργία των τεχνικών συστημάτων, η αξιοποίηση μεγάλων γλωσσικών μοντέλων για την επεξεργασία πραγματικού αρχιτεκτονικού υλικού και την παραγωγή συγκρίσιμων σεναρίων αναβάθμισης σχολικών κτιρίων παραμένει περιορισμένα διερευνημένη. Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να εξετάσει κατά πόσο το ChatGPT και το Gemini μπορούν, υπό κοινές συνθήκες εισροών και οδηγιών, να αναλύσουν την υφιστάμενη κατάσταση της νότιας ζώνης του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου, να διαμορφώσουν εναλλακτικά σενάρια βιοκλιματικής αναβάθμισης και να αναγνωρίσουν τις τεχνικές και αρχιτεκτονικές αβεβαιότητες των προτάσεών τους. Η συμβολή της έρευνας εντοπίζεται στην ελεγχόμενη σύγκριση δύο πολυτροπικών γλωσσικών μοντέλων, τα οποία επεξεργάζονται το ίδιο πληροφοριακό υλικό και αξιολογούνται

βάσει κοινού πλαισίου βιοκλιματικών, τεχνικών και αρχιτεκτονικών κριτηρίων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Ερευνητικός σχεδιασμός, μελέτη περίπτωσης και υλικό

Η έρευνα οργανώθηκε ως συγκριτική μελέτη περίπτωσης με σχεδιαστικό προσανατολισμό. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιλέχθηκε επειδή επιτρέπει την εξέταση ενός σύνθετου αρχιτεκτονικού προβλήματος μέσα στο πραγματικό χωρικό, ιστορικό και λειτουργικό του πλαίσιο, καθώς και τον συνδυασμό διαφορετικών μορφών τεκμηρίωσης (Groat & Wang, 2013).

Ως μελέτη περίπτωσης χρησιμοποιήθηκε το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο Αγρινίου, τμήμα του ιστορικού συγκροτήματος των Παπαστρατειών Εκπαιδευτηρίων. Η εμπειρική διερεύνηση περιορίστηκε στη νότια ζώνη του κτιρίου, η οποία περιλάμβανε τη νότια όψη, τα αντίστοιχα ανοίγματα και τις άμεσα συνδεδεμένες αίθουσες, τα υφιστάμενα στοιχεία σκίασης και αερισμού και, όπου υπήρχαν επαρκή δεδομένα, τον γειτονικό αύλειο χώρο. Η οριοθέτηση επέτρεψε την εστιασμένη εξέταση του ηλιασμού, της ηλιοπροστασίας, του φυσικού φωτισμού, του αερισμού και της θερινής θερμικής άνεσης, χωρίς να επιχειρείται συνολική ενεργειακή μελέτη του σχολικού συγκροτήματος.

Στο ChatGPT και στο Gemini χορηγήθηκε κοινό πληροφοριακό πακέτο, το οποίο περιλάμβανε αρχιτεκτονικά σχέδια, φωτογραφική τεκμηρίωση, τεχνική περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης, πληροφορίες για την ιστορική και μορφολογική ταυτότητα του κτιρίου και βασικά κλιματικά στοιχεία για το Αγρίνιο.

Στο παρεχόμενο υλικό καταγράφηκαν τόσο τα διαθέσιμα όσο και τα ελλείποντα δεδομένα. Μεταξύ άλλων, ήταν γνωστή η χρήση κουρτινών στα νότια ανοίγματα και η

μεταβολή της αρχικής διαμόρφωσης του αερισμού. Δεν ήταν, όμως, διαθέσιμες επιτόπιες μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, CO₂, φυσικού φωτισμού και παροχής αέρα, ούτε πλήρη στοιχεία για τα κουφώματα, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του κελύφους και τις ενεργειακές καταναλώσεις.

2.2 Διαδικασία παραγωγής και αξιολόγησης των σεναρίων

Για κάθε εφαρμογή δημιουργήθηκε νέα και ανεξάρτητη συνομιλία. Τα ίδια αρχεία υποβλήθηκαν με την ίδια σειρά και χρησιμοποιήθηκε κοινός κορμός φυσικογλωσσικών οδηγιών στην ελληνική γλώσσα. Η χρήση κοινών εισροών και προκαθορισμένων prompts αποσκοπούσε στον περιορισμό των διαφορών που θα μπορούσαν να οφείλονται σε άνιση αρχική πληροφόρηση. Οι απαντήσεις καταγράφηκαν αυτούσιες, χωρίς γλωσσική ή τεχνική διόρθωση, ενώ τα εργαλεία δεν χρησιμοποιήθηκαν ως λογισμικά ενεργειακής ή μικροκλιματικής προσομοίωσης. Η χρήση μεγάλων γλωσσικών μοντέλων μέσω prompting επιτρέπει την προσαρμογή τους σε συγκεκριμένες εργασίες, αλλά η ποιότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται σημαντικά από τη σαφήνεια των δεδομένων, των ζητούμενων και των περιορισμών (Bommasani et al., 2021; Zhao et al., 2023).

Η διαδικασία περιλάμβανε τρία διαδοχικά στάδια. Αρχικά, τα δύο μοντέλα κλήθηκαν να αναλύσουν την υφιστάμενη κατάσταση και να διακρίνουν τις επιβεβαιωμένες πληροφορίες από τις υποθέσεις. Στη συνέχεια, κάθε εργαλείο παρήγαγε δύο σεναρία: ένα ελάχιστης και περισσότερο άμεσα εφαρμόσιμης παρέμβασης και ένα ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης. Τέλος, ζητήθηκε η ιεράρχηση και ο κριτικός αυτοέλεγχος των προτάσεων, με αναφορά στα στοιχεία που απαιτούσαν αυτοψία, μέτρηση ή εξειδικευμένη τεχνική μελέτη. Ο αυτοέλεγχος αντιμετωπίστηκε ως μέσο αναγνώρισης της αβεβαιότητας και όχι

ως ανεξάρτητη επαλήθευση της τεχνικής ορθότητας, καθώς τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να παράγουν εύλογες αλλά ανεπαρκώς τεκμηριωμένες απαντήσεις (Huang et al., 2023; Tonmoy et al., 2024).

Τα τέσσερα σενάρια αξιολογήθηκαν βάσει πέντε ισοβαρών κριτηρίων: α) αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού, β) βιοκλιματική καταλληλότητα, γ) τεχνική εφαρμοσιμότητα, δ) αρχιτεκτονική συμβατότητα και ε) τεκμηρίωση και αναγνώριση των περιορισμών. Η επιλογή των κριτηρίων στηρίχθηκε στη βιβλιογραφία για τη βιώσιμη αναβάθμιση σχολικών κτιρίων, την περιβαλλοντική άνεση και τις επεμβάσεις σε ιστορικά κτίρια (Le et al., 2021; Saraiva et al., 2018, 2019; Webb, 2017). Κάθε κριτήριο βαθμολογήθηκε από 1 έως 5 και συνοδεύτηκε από ποιοτική αιτιολόγηση. Η συνολική βαθμολογία χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τη συστηματική σύγκριση των σεναρίων και όχι ως στατιστικά επικυρωμένο ή γενικεύσιμο μέτρο της συνολικής απόδοσης των δύο εφαρμογών.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης

Το ChatGPT και το Gemini παρουσίασαν σημαντική σύγκλιση ως προς τα βασικά ζητήματα της νότιας ζώνης του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου. Και τα δύο μοντέλα αναγνώρισαν τη σημασία του νότιου προσανατολισμού και των μεγάλων ανοιγμάτων, το δυναμικό φυσικού φωτισμού, την πιθανότητα θερινής ηλιακής επιβάρυνσης, τη μεταβολή της αρχικής λειτουργίας του αερισμού, την παρουσία επιμέρους κλιματιστικών μονάδων και την πιθανή μικροκλιματική επίδραση των σκληρών επιφανειών της αυλής. Αναγνώρισαν επίσης ότι οι παρεμβάσεις έπρεπε να προστατεύουν τη λιθοδομή, τα ξύλινα κουφώματα, τον ρυθμό των ανοιγμάτων και τη συνολική μορφολογία του ιστορικού κτιρίου.

Η βασική διαφορά εντοπίστηκε στον τρόπο διαχείρισης της αβεβαιότητας. Το ChatGPT διέκρινε συστηματικότερα τα επιβεβαιωμένα στοιχεία από τις εύλογες υποθέσεις. Για παράδειγμα, αναγνώρισε την παρουσία κουρτινών και κλεισμένων οπών αερισμού, αλλά απέφυγε να θεωρήσει αποδεδειγμένες την ανεπάρκεια της ηλιοπροστασίας, την υπερθέρμανση ή την ανεπαρκή ανανέωση του αέρα χωρίς αντίστοιχες μετρήσεις. Το Gemini διατύπωσε σαφέστερες διαγνώσεις, χαρακτηρίζοντας την εξωτερική ηλιοπροστασία ανεπαρκή και θεωρώντας ότι οι μεταβολές είχαν ακυρώσει τον αρχικό διαμπερή αερισμό. Οι εκτιμήσεις αυτές ήταν βιοκλιματικά εύλογες, αλλά παρουσιάστηκαν με μεγαλύτερη βεβαιότητα από όση επέτρεπε το διαθέσιμο υλικό.

3.2 Σύγκριση των προτεινόμενων σεναρίων

Κάθε μοντέλο παρήγαγε ένα σενάριο ελάχιστης παρέμβασης και ένα σενάριο ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης. Τα τέσσερα σενάρια κινήθηκαν στους ίδιους βασικούς άξονες: ηλιοπροστασία, φυσικός φωτισμός, φυσικός αερισμός, κουφώματα, ενεργητική ψύξη και μικροκλίμα του αύλειου χώρου. Κοινό θετικό στοιχείο ήταν ότι κανένα μοντέλο δεν πρότεινε γενικευμένη εξωτερική θερμομόνωση της λιθοδομής ή άκριτη αντικατάσταση των χαρακτηριστικών ξύλινων κουφωμάτων.

Το ελάχιστο σενάριο του ChatGPT βασίστηκε στη διαδοχή καταγραφή - έλεγχος - συντήρηση - επιλεκτική εφαρμογή. Πρότεινε τη λειτουργική αξιοποίηση της υπάρχουσας ηλιοπροστασίας, τη συντήρηση των κουφωμάτων, τον έλεγχο των διαδρομών αερισμού, τον συντονισμό των κλιματιστικών και περιορισμένες, αναστρέψιμες παρεμβάσεις σκίασης και φύτευσης. Η προσέγγιση αυτή είχε μικρό κατασκευαστικό και μορφολογικό κίνδυνο, αλλά περιορισμένη δυνατότητα συνολικής

αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Το αντίστοιχο σενάριο του Gemini ήταν πιο άμεσα προσανατολισμένο σε συγκεκριμένες εργασίες, όπως η επαναλειτουργία των παντζουριών, η αντικατάσταση των κουρτινών, η διάνοιξη των οπών αερισμού και η τοπική αφαίρεση ασφάλτου. Οι προτάσεις ήταν ευκολότερα κατανοητές ως κατασκευαστικές λύσεις, αλλά δεν παρουσίαζαν όλες τον ίδιο βαθμό αναστρεψιμότητας και τεχνικής ετοιμότητας. Ειδικά η επέμβαση στην ασφαλτο και η διάνοιξη των οπών απαιτούσαν περισσότερους ελέγχους από όσους υποδήλωνε ο χαρακτηρισμός τους ως άμεσα εφαρμόσιμων.

Στα ολοκληρωμένα σενάρια η διαφοροποίηση έγινε εντονότερη. Το ChatGPT αντιμετώπισε τη νότια ζώνη ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα και συνέδεσε την εξωτερική σκίαση, την αποκατάσταση των κουφωμάτων, τον αερισμό, την ψύξη και τον αύλειο χώρο. Η τελική μορφή των λύσεων παρέμεινε ανοικτή, μέχρι να προηγηθούν ηλιακές, φωτομετρικές, στατικές και ηλεκτρομηχανολογικές μελέτες.

Το Gemini πρότεινε περισσότερο συγκεκριμένες μεταβολές, όπως νέα ξύλινα παντζούρια στον πρώτο όροφο, αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων, αντικατάσταση των σκληρών επιφανειών της αυλής, μεταφορά ή απόκρυψη των κλιματιστικών και ενσωμάτωση των πλεγμάτων στα κουφώματα. Οι λύσεις αυτές ήταν άμεσα οπτικοποιήσιμες και έδιναν μεγαλύτερη έμφαση στη μορφολογική αποκατάσταση. Παράλληλα, στηρίζονταν σε περισσότερες μη επιβεβαιωμένες παραδοχές σχετικά με την αρχική μορφή του κτιρίου, τη δυνατότητα αγκύρωσης, την κατάσταση των κουφωμάτων και την τεχνική δυνατότητα μεταφοράς των εγκαταστάσεων.

3.3 Συγκριτική αξιολόγηση και ερμηνεία

Η αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων ανέδειξε υψηλότερη συνολική ανταπόκριση των προτάσεων του ChatGPT στα κριτήρια της παρούσας έρευνας. Το ελάχιστο και το ολοκληρωμένο σενάριο του ChatGPT συγκέντρωσαν αντίστοιχα 23/25 και 22/25 βαθμούς, ενώ τα αντίστοιχα σενάρια του Gemini 19/25 και 17/25. Οι διαφορές συνδέθηκαν κυρίως με την αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού, την αναγνώριση των ελλειπόντων δεδομένων και την προσεκτικότερη σύνδεση των προτάσεων με τις τεχνικές και αρχιτεκτονικές προϋποθέσεις εφαρμογής.

Το ελάχιστο σενάριο του ChatGPT παρουσίασε την καλύτερη ισορροπία μεταξύ βιοκλιματικής λογικής, εφαρμοσιμότητας και προστασίας της αρχιτεκτονικής φυσιογνωμίας. Η έμφαση στη συντήρηση, στον έλεγχο και στις αναστρεψίμες παρεμβάσεις περιόριζε τον τεχνικό και μορφολογικό κίνδυνο. Αντίθετα, το ολοκληρωμένο σενάριο εμφάνιζε μεγαλύτερο δυνητικό περιβαλλοντικό όφελος, αλλά απαιτούσε περισσότερες ενεργειακές, στατικές και ηλεκτρομηχανολογικές μελέτες. Συνεπώς, η μικρότερη τεχνική εφαρμοσιμότητά του δεν υποδήλωνε χαμηλότερη σχεδιαστική ποιότητα, αλλά μεγαλύτερη πολυπλοκότητα.

Τα σενάρια του Gemini ήταν περισσότερο συγκεκριμένα και εύκολα οπτικοποιήσιμα. Η ιδιότητα αυτή μπορεί να είναι χρήσιμη κατά το στάδιο της αρχικής ιδεοπαραγωγής, καθώς μετατρέπει γρήγορα τις γενικές βιοκλιματικές αρχές σε σαφείς σχεδιαστικές κατευθύνσεις. Ωστόσο, ορισμένες προτάσεις προϋπέθεταν στοιχεία που δεν είχαν επιβεβαιωθεί, όπως η δυνατότητα επαναλειτουργίας συγκεκριμένων διαδρομών αερισμού, η ιστορική συμβατότητα νέων παντζουριών και η τεχνική δυνατότητα μεταφοράς των κλιματιστικών μονάδων. Για τον λόγο αυτό, αξιολογήθηκαν χαμηλότερα ως προς την τεκμηρίωση και την αναγνώριση των περιορισμών.

Οι βαθμολογίες δεν αποτελούν μέτρο της πραγματικής ενεργειακής ή μικροκλιματικής απόδοσης των λύσεων ούτε τεκμηριώνουν γενική υπεροχή του ενός μοντέλου. Αποτυπώνουν αποκλειστικά την ανταπόκριση των συγκεκριμένων απαντήσεων στα δεδομένα και στα κριτήρια της μελέτης περίπτωσης. Το βασικό εύρημα είναι ότι η χρησιμότητα των γλωσσικών μοντέλων εξαρτάται κυρίως από το κατά πόσο διακρίνουν τα διαθέσιμα στοιχεία από τις υποθέσεις και αναγνωρίζουν τους ελέγχους που πρέπει να προηγηθούν μιας πραγματικής παρέμβασης.

Υπό αυτή την έννοια, το ChatGPT φάνηκε καταλληλότερο για τη σταδιακή και τεχνικά επιφυλακτική οργάνωση του προβλήματος, ενώ το Gemini υποστήριξε αποτελεσματικότερα την παραγωγή άμεσων και οπτικά σαφών ιδεών. Και τα δύο εργαλεία μπορούν να συμβάλουν στα προκαταρκτικά στάδια του σχεδιασμού, αλλά τα αποτελέσματά τους απαιτούν επαλήθευση μέσω αυτοψίας, μετρήσεων, προσομοιώσεων και αξιολόγησης από τους αρμόδιους μελετητές.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα έρευνα έδειξε ότι το ChatGPT και το Gemini μπορούν να υποστηρίξουν την προκαταρκτική διερεύνηση ενός προβλήματος βιοκλιματικής αναβάθμισης, όταν τους παρέχεται οργανωμένο αρχιτεκτονικό, φωτογραφικό, τεχνικό και κλιματικό υλικό. Και τα δύο μοντέλα αναγνώρισαν τους βασικούς άξονες παρέμβασης στη νότια ζώνη του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου, όπως την ηλιοπροστασία, τον φυσικό φωτισμό και αερισμό, τα ξύλινα κουφώματα, την ενεργητική ψύξη και τη σχέση του κτιρίου με τον αύλειο χώρο.

Η σύγκριση ανέδειξε διαφορετικούς τρόπους αξιοποίησης των ίδιων δεδομένων. Το ChatGPT ακολούθησε περισσότερο σταδιακή και επιφυλακτική προσέγγιση, δίνοντας έμφαση στη συντήρηση, στην

αναστρεψιμότητα των παρεμβάσεων και στην ανάγκη προηγούμενων ελέγχων. Το Gemini παρήγαγε περισσότερο συγκεκριμένες και εύκολα οπτικοποιήσιμες λύσεις, οι οποίες μπορούν να ενισχύσουν την αρχική ιδεοπαραγωγή, αλλά βασίστηκαν συχνότερα σε μη επιβεβαιωμένες τεχνικές ή μορφολογικές παραδοχές. Η διαφοροποίηση αυτή υποδεικνύει ότι τα δύο μοντέλα μπορεί να είναι χρήσιμα σε διαφορετικά στάδια της σχεδιαστικής διαδικασίας.

Η υψηλότερη βαθμολογική ανταπόκριση των σεναρίων του ChatGPT συνδέθηκε κυρίως με τη συστηματικότερη αξιοποίηση του πληροφοριακού υλικού και τη σαφέστερη αναγνώριση των περιορισμών. Οι βαθμολογίες, ωστόσο, δεν αποτελούν μέτρηση της πραγματικής ενεργειακής ή μικροκλιματικής απόδοσης των προτάσεων και δεν μπορούν να γενικευθούν πέρα από τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης.

Βασικός περιορισμός της έρευνας ήταν η απουσία επιτόπιων μετρήσεων, ενεργειακών και μικροκλιματικών προσομοιώσεων και πλήρων στοιχείων για τα τεχνικά συστήματα και την κατασκευαστική κατάσταση του κτιρίου. Επιπλέον, εξετάστηκε μία μόνο χωρική ζώνη και μία εκτέλεση ανά μοντέλο, ενώ τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τη διατύπωση των prompts και τις συγκεκριμένες εκδόσεις των εφαρμογών.

Συνεπώς, η παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο σύνθεσης πληροφοριών, παραγωγής εναλλακτικών και αρχικής οργάνωσης των σχεδιαστικών αποφάσεων. Δεν μπορεί, όμως, να υποκαταστήσει την αυτοψία, τις μετρήσεις, τις τεχνικές μελέτες και την επαγγελματική κρίση. Στην περίπτωση του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου, η ασφαλέστερη πορεία είναι η σταδιακή μετάβαση από την τεκμηρίωση και τη συντήρηση σε πιλοτικές παρεμβάσεις και, στη συνέχεια, σε εκτενέστερη αναβάθμιση μόνο όταν αυτή υποστηρίζεται

από επαρκή τεχνικά και περιβαλλοντικά δεδομένα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adewale, B. A., Ene, V. O., Ogunbayo, B. F., & Aigbavboa, C. O. (2024). A systematic review of the applications of AI in a sustainable building's lifecycle. *Buildings*, 14(7), 2137. <https://doi.org/10.3390/buildings14072137>
- Antoniadis, D., Katsoulas, N., & Papanastasiou, D. K. (2020). Thermal environment of urban schoolyards: Current and future design with respect to children's thermal comfort. *Atmosphere*, 11(11), 1144. <https://doi.org/10.3390/atmos11111144>
- Binabid, J., Alymani, A., & Alammari, A. (2024). Optimizing outdoor thermal comfort for educational buildings: Case study in the city of Riyadh. *Buildings*, 14(11), 3568. <https://doi.org/10.3390/buildings14113568>
- Bommasani, R., Hudson, D. A., Adeli, E., Altman, R., Arora, S., von Arx, S., Bernstein, M. S., Bohg, J., Bosselut, A., Brunskill, E., Brynjolfsson, E., Buch, S., Card, D., Castellon, R., Chatterji, N., Chen, A., Creel, K., Davis, J. Q., Demszky, D., ... Liang, P. (2021). On the opportunities and risks of foundation models. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07258>
- Debrah, C., Chan, A. P. C., & Darko, A. (2022). Artificial intelligence in green building. *Automation in Construction*, 137, 104192. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104192>
- Groat, L., & Wang, D. (2013). *Architectural research methods* (2nd ed.). Wiley.
- Huang, L., Yu, W., Ma, W., Zhong, W., Feng, Z., Wang, H., Chen, Q., Peng, W., Feng, X., Qin, B., & Liu, T. (2023). A survey on hallucination in large language models: Principles, taxonomy, challenges, and open questions <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.05232>
- Le, A., Park, K. S., Domingo, N., Rasheed, E., & Mithraratne, N. (2021). Sustainable refurbishment for school buildings: A literature review. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 39(1), 5-19. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-01-2018-0009>
- Mendell, M. J., & Heath, G. A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, 15(1), 27-52. <https://doi.org/10.1111/j.16000668.2004.00320>
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 122, 103517. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- Saraiva, T. S., de Almeida, M., Bragança, L., & Barbosa, M. T. (2018). Environmental comfort indicators for school buildings in sustainability assessment tools. *Sustainability*, 10(6), 1849.
- Saraiva, T. S., de Almeida, M., & Bragança, L. (2019). Adaptation of the SBTool for sustainability assessment of high school buildings in Portugal-SAHSBPT. *Applied Sciences*, 9(13), 2664.
- Tonmoy, S. M. T. I., Zaman, S. M. M., Jain, V., Rani, A., Rawte, V., Chadha, A., & Das, A. (2024). A comprehensive survey of hallucination mitigation techniques in large language models. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.01313>
- Toyinbo, O. (2023). Indoor environmental quality, pupils' health, and academic performance: A literature review. *Buildings*, 13(9), 2172. <https://doi.org/10.3390/buildings13092172>
- Webb, A. L. (2017). Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 748-759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>

- Zhao, W. X., Zhou, K., Li, J., Tang, T., Wang, X., Hou, Y., Min, Y., Zhang, B., Zhang, J., Dong, Z., Du, Y., Yang, C., Chen, Y., Chen, Z., Jiang, J., Ren, R., Li, Y., Tang, X., Liu, Z., ... Wen, J.-R. (2023). A survey of large language models
- Γκρίζης, Δ. (2015). *Τα σχολεία του Μεσοπολέμου στο Αγρίνιο* [Ερευνητική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων

1. Εισαγωγή

1.1 Θεματικό πλαίσιο και σημασία του θέματος

Η συζήτηση για τη βιωσιμότητα του δομημένου περιβάλλοντος έχει αναδειχθεί σε έναν από τους πλέον κρίσιμους άξονες της σύγχρονης επιστημονικής και επαγγελματικής ατζέντας. Η κλιματική κρίση, η εξάντληση των φυσικών πόρων, η ενεργειακή ανασφάλεια και η περιβαλλοντική υποβάθμιση καθιστούν επιτακτική την αναθεώρηση του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται, λειτουργούν και αναβαθμίζονται τα κτίρια. Ο κτιριακός τομέας παρουσιάζει σημαντικό ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα, γεγονός που τον καθιστά ταυτόχρονα μέρος του προβλήματος και κομβικό πεδίο παρέμβασης για τη μετάβαση σε ένα περισσότερο βιώσιμο και ανθεκτικό μοντέλο ανάπτυξης (Adewale et al., 2024; Debrah et al., 2022).

Στο πλαίσιο αυτό, τα σχολικά κτίρια συνιστούν μια ιδιαίτερα ευαίσθητη και στρατηγική κατηγορία του δομημένου περιβάλλοντος. Δεν αποτελούν απλώς χώρους στέγασης εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων, αλλά περιβάλλοντα μέσα στα οποία τα παιδιά και οι εκπαιδευτικοί περνούν σημαντικό μέρος της καθημερινότητάς τους. Η ποιότητα του σχολικού κτιρίου ως προς τον φυσικό φωτισμό, τον αερισμό, τη θερμική και ακουστική άνεση και την ποιότητα του εσωτερικού αέρα συνδέεται με την υγεία, την ευεξία, τη σχολική παρουσία και τις συνθήκες μάθησης των μαθητών (Mendell & Heath, 2005; Toyinbo, 2023). Παράλληλα, η εκπαίδευση για τη βιωσιμότητα επιτρέπει να αντιμετωπιστεί το ίδιο το σχολικό κτίριο ως «τρισδιάστατο βιβλίο» ή ως βιωματικό μαθησιακό μέσο, μέσα από το οποίο οι χωρικές, περιβαλλοντικές και τεχνικές επιλογές μπορούν να καταστούν ορατές και κατανοητές στους μαθητές (Τατσί, 2015).

Ιδιαίτερη σημασία, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αποκτούν οι σχολικές αυλές και οι υπαίθριοι χώροι των εκπαιδευτικών μονάδων. Οι χώροι αυτοί χρησιμοποιούνται καθημερινά για διάλειμμα, κίνηση, παιχνίδι και κοινωνική αλληλεπίδραση, ενώ η διαμόρφωσή τους επηρεάζει τις συνθήκες στις οποίες εκτίθενται τα παιδιά. Η ηλικιακή αυτή ομάδα είναι περισσότερο ευάλωτη από τους ενήλικες στη θερμική καταπόνηση και στην έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και ηλιακή ακτινοβολία. Παράλληλα, η μορφή της αυλής, τα υλικά των επιφανειών, η παρουσία βλάστησης και η διαθεσιμότητα σκιάς επηρεάζουν τη θερμοκρασία των επιφανειών, το ακτινοβολιακό φορτίο και τη θερμική

άνεση των χρηστών (Antoniadis et al., 2020). Στην ελληνική περίπτωση έχει καταγραφεί ότι πολλές σχολικές αυλές καλύπτονται κυρίως από αδιαπέραστα υλικά, όπως τσιμέντο και ασφαλτος, ενώ το πράσινο και τα δέντρα είναι συχνά περιορισμένα στις περιμετρικές ζώνες. Η οργάνωσή τους γύρω από ορισμένες κυρίαρχες αθλητικές χρήσεις μπορεί, επίσης, να περιορίζει την ανάπτυξη άλλων δραστηριοτήτων (Tsirogiannis et al., 2015).

Η βιώσιμη αναβάθμιση ενός σχολικού κτιρίου και του άμεσα συνδεδεμένου υπαίθριου χώρου δεν αποτελεί, επομένως, ένα μονοδιάστατο τεχνικό πρόβλημα. Απαιτεί τη συνεκτίμηση πολλαπλών παραμέτρων, όπως η ενεργειακή απόδοση, η θερμική άνεση, η ποιότητα του αέρα, η ασφάλεια, η προσβασιμότητα, η λειτουργικότητα, η παιδαγωγική αξιοποίηση, η αρχιτεκτονική συμβατότητα, το κόστος και οι δυνατότητες συντήρησης. Τα ειδικά συστήματα αξιολόγησης σχολικών κτιρίων επιβεβαιώνουν αυτή την πολυκριτηριακή προσέγγιση, καθώς οργανώνουν την αξιολόγηση σε περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές κατηγορίες και λαμβάνουν υπόψη τόσο την απόδοση του κτιρίου όσο και την υγεία, την άνεση και τις ιδιαίτερες ανάγκες των χρηστών του (Saraiva et al., 2019). Συνεπώς, η αναβάθμιση των σχολικών υποδομών απαιτεί συστηματική και προσαρμοσμένη στη συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυση και δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε αποσπασματικές παρεμβάσεις ή σε γενικές αρχές που εφαρμόζονται χωρίς έλεγχο του πραγματικού κτιρίου.

Παράλληλα, ο χώρος της αρχιτεκτονικής και των κατασκευών έχει εισέλθει σε μια εκτεταμένη διαδικασία ψηφιακού μετασχηματισμού. Η διάδοση της Μοντελοποίησης Πληροφοριών Κτιρίου (*Building Information Modelling- BIM*), του παραμετρικού σχεδιασμού και των ψηφιακών εργαλείων ανάλυσης έχει διευκολύνει την οργάνωση και τη διαχείριση γεωμετρικών, λειτουργικών και τεχνικών δεδομένων. Η ανάπτυξη της ΤΝ (Τεχνητής Νοημοσύνης) διευρύνει περαιτέρω αυτές τις δυνατότητες, καθώς οι σχετικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση προτύπων, την πρόβλεψη, τη βελτιστοποίηση, τη σύνθεση πληροφοριών και την υποστήριξη διαδικασιών λήψης αποφάσεων σε διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής των κτιρίων (Pan & Zhang, 2021).

Στο πεδίο των πράσινων και βιώσιμων κτιρίων, οι εφαρμογές της ΤΝ σχετίζονται κυρίως με την ενεργειακή βελτιστοποίηση, την προσομοίωση σχεδιαστικών επιλογών, την προγνωστική συντήρηση, τη διαχείριση τεχνικών συστημάτων και την επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων. Υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις, μπορούν να διευρύνουν το φάσμα των εξεταζόμενων εναλλακτικών και να υποστηρίξουν περισσότερο

συστηματικές προκαταρκτικές αποφάσεις (Adewale et al., 2024; Debrah et al., 2022). Οι δυνατότητες αυτές δεν συνεπάγονται, ωστόσο, ότι οι προτάσεις των εργαλείων TN είναι αυτομάτως τεχνικά ορθές ή κατάλληλες για εφαρμογή. Η αξιοποίησή τους εξαρτάται από την ποιότητα και την πληρότητα των διαθέσιμων δεδομένων, τη σαφήνεια των ζητούμενων και την επακόλουθη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από ανθρώπους με την κατάλληλη επιστημονική και τεχνική γνώση.

Παρότι η βιβλιογραφία για την TN στα πράσινα και «έξυπνα» κτίρια έχει διευρυνθεί σημαντικά, οι σχετικές ανασκοπήσεις επικεντρώνονται κυρίως σε γενικές κτιριακές εφαρμογές, στην ενεργειακή απόδοση και στη λειτουργία των τεχνικών συστημάτων. Αντίστοιχα, οι μελέτες για τις σχολικές αυλές εξετάζουν κυρίως το μικροκλίμα, τη σκίαση, τη βλάστηση και τη θερμική άνεση, χωρίς να συνδέονται συστηματικά με τη χρήση μεγάλων γλωσσικών μοντέλων για την παραγωγή και τη συγκριτική αξιολόγηση προκαταρκτικών σεναρίων. Η παράλληλη ανάγνωση των δύο αυτών πεδίων αναδεικνύει ένα ειδικό πεδίο διερεύνησης στη διασταύρωση της βιώσιμης σχολικής αρχιτεκτονικής, του βιοκλιματικού σχεδιασμού και της παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης (Adewale et al., 2024; Antoniadis et al., 2020; Binabid et al., 2024; Debrah et al., 2022).

Η παρούσα εργασία εντάσσεται σε αυτό ακριβώς το σημείο τομής. Το θεωρητικό της μέρος εξετάζει ευρύτερα τη βιωσιμότητα των σχολικών κτιρίων και αυλών και τις εφαρμογές της TN στον δομημένο χώρο, ενώ η εμπειρική διερεύνηση επικεντρώνεται ειδικότερα στη χρήση του ChatGPT και του Gemini για την παραγωγή προκαταρκτικών σεναρίων βιοκλιματικής αναβάθμισης της νότιας ζώνης του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία διερευνά όχι μόνο τις δυνατότητες των δύο εργαλείων να προτείνουν εναλλακτικές παρεμβάσεις, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αξιοποιούν τα διαθέσιμα δεδομένα, διαχειρίζονται την αβεβαιότητα και αναγνωρίζουν τα όρια των προτάσεών τους.

1.2 Η Τεχνητή Νοημοσύνη στην αρχιτεκτονική και στον κατασκευαστικό τομέα

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) περιλαμβάνει ένα ευρύ σύνολο υπολογιστικών μεθόδων που επιτρέπουν στα συστήματα να αναγνωρίζουν πρότυπα, να επεξεργάζονται δεδομένα, να πραγματοποιούν προβλέψεις και να υποστηρίζουν διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Τα τελευταία χρόνια, οι μέθοδοι αυτές έχουν εισέλθει δυναμικά στον χώρο της

αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και της διαχείρισης κατασκευαστικών έργων. Η διεθνής βιβλιογραφία καταγράφει σημαντική αύξηση των σχετικών εφαρμογών, με έμφαση στη μοντελοποίηση και αναγνώριση προτύπων, στην πρόβλεψη και στη βελτιστοποίηση διαφορετικών διαδικασιών του κλάδου των κατασκευών (Pan & Zhang, 2021).

Η ανάπτυξη της TN στον κλάδο δεν πραγματοποιείται ανεξάρτητα από την ευρύτερη πορεία ψηφιοποίησης του δομημένου περιβάλλοντος. Η διάδοση της Μοντελοποίησης Πληροφοριών Κτιρίου (*Building Information Modelling- BIM*) έχει διευκολύνει την οργάνωση γεωμετρικών, λειτουργικών και τεχνικών δεδομένων σε ενιαία ψηφιακά μοντέλα. Παράλληλα, ο παραμετρικός και υπολογιστικός σχεδιασμός έχει εισαγάγει τη δυνατότητα συστηματικής διερεύνησης εναλλακτικών λύσεων βάσει προκαθορισμένων περιορισμών και κριτηρίων. Η ενσωμάτωση της TN σε αυτά τα ψηφιακά περιβάλλοντα μπορεί να υποστηρίξει την αυτοματοποίηση διαδικασιών, την αναγνώριση προβληματικών σημείων, την οργάνωση μεγάλου όγκου πληροφοριών και την πρόταση εναλλακτικών κατευθύνσεων κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των κτιρίων (Kutá & Faltejsek, 2025).

Ένα πρώτο σημαντικό πεδίο εφαρμογής αφορά τις αναλυτικές και προγνωστικές εργασίες. Μέθοδοι μηχανικής μάθησης και άλλες τεχνικές TN χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης, την εκτίμηση κόστους και χρονοδιαγραμμάτων, την αναγνώριση κατασκευαστικών κινδύνων, την παρακολούθηση της προόδου των έργων και την ανίχνευση αποκλίσεων από τον αρχικό σχεδιασμό. Η χρησιμότητα των εφαρμογών αυτών βασίζεται στην ικανότητά τους να επεξεργάζονται μεγάλο αριθμό μεταβλητών και να αναγνωρίζουν σχέσεις που δεν είναι πάντοτε άμεσα εμφανείς μέσα από συμβατικές διαδικασίες ανάλυσης. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων τους εξαρτάται, ωστόσο, από την πληρότητα, την ακρίβεια και την αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων στα οποία βασίζονται (Pan & Zhang, 2021).

Ένα δεύτερο πεδίο αφορά τη βελτιστοποίηση και την παραγωγή εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων. Οι σχετικές εφαρμογές περιλαμβάνουν εξελικτικούς και πολυκριτηριακούς αλγόριθμους, παραμετρικές διαδικασίες και συστήματα παραγωγικού σχεδιασμού (*generative design*). Τα συστήματα αυτά μπορούν να παράγουν και να συγκρίνουν μεγάλο αριθμό εναλλακτικών προτάσεων με βάση κριτήρια όπως η ενεργειακή απόδοση, η μορφολογία, ο φυσικός φωτισμός, η θερμική άνεση, η χρήση υλικών και το κόστος. Οι σχετικές ανασκοπήσεις δείχνουν ότι ο παραγωγικός σχεδιασμός

μπορεί να διευρύνει το φάσμα των διαθέσιμων επιλογών και να υποστηρίξει τη διερεύνηση περισσότερο σύνθετων σχέσεων μεταξύ σχεδιαστικών μεταβλητών και κτιριακής απόδοσης (Suphavarophas et al., 2024).

Στον χώρο της αρχιτεκτονικής σύνθεσης, η TN μπορεί να αναλάβει διαφορετικό βαθμό συμμετοχής στη σχεδιαστική διαδικασία. Σε ορισμένες περιπτώσεις λειτουργεί υποστηρικτικά, αναλαμβάνοντας υπολογισμούς, προβλέψεις ή επαναλαμβανόμενες εργασίες. Σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιείται συνεργατικά, καθώς ο μελετητής διατυπώνει τα ζητούμενα, αξιολογεί τα ενδιάμεσα αποτελέσματα και επανακαθορίζει τους περιορισμούς μέσα από διαδοχικούς κύκλους αλληλεπίδρασης. Παρά την αυξημένη δυνατότητα αυτοματοποίησης, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η TN δεν διαθέτει από μόνη της πλήρη κατανόηση του ιστορικού, κοινωνικού, πολιτισμικού και λειτουργικού πλαισίου ενός αρχιτεκτονικού έργου. Για τον λόγο αυτό, η ανθρώπινη κρίση παραμένει απαραίτητη για την ερμηνεία, την επιλογή και την προσαρμογή των παραγόμενων λύσεων (Albukhari, 2025).

Ένα τρίτο σημαντικό πεδίο αφορά τη λειτουργία και τη διαχείριση των κτιρίων. Σε αυτό το στάδιο, η TN μπορεί να συνδεθεί με αισθητήρες, συστήματα αυτοματισμού, ψηφιακά δίδυμα και δεδομένα πραγματικού χρόνου, ώστε να παρακολουθεί παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η ποιότητα του αέρα, η ενεργειακή κατανάλωση και η λειτουργία του τεχνικού εξοπλισμού. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ανωμαλιών, την προγνωστική συντήρηση και την προσαρμογή των τεχνικών συστημάτων στις πραγματικές συνθήκες χρήσης. Τα σχετικά συστήματα επιδιώκουν τη μετάβαση από την απλή παρακολούθηση του κτιρίου προς περισσότερο προσαρμοστικές μορφές λειτουργίας, στις οποίες οι ρυθμίσεις μπορούν να μεταβάλλονται με βάση τις συνθήκες του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος (Genkin & McArthur, 2023).

Η σύνδεση της TN με ψηφιακά δίδυμα αποκτά ιδιαίτερη σημασία στα έξυπνα, πράσινα και σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης κτίρια. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να συγκεντρώνουν δεδομένα από το φυσικό κτίριο και να τα συνδέουν με ψηφιακές αναπαραστάσεις, υπολογιστικά μοντέλα και αλγορίθμους πρόβλεψης. Με αυτόν τον τρόπο υποστηρίζονται η συνεχής παρακολούθηση, η προγνωστική ανάλυση, η ανίχνευση βλαβών και η προσαρμογή των λειτουργικών στρατηγικών. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή αυτών των συστημάτων προϋποθέτει επαρκείς ψηφιακές υποδομές, αξιόπιστους

αισθητήρες, δια λειτουργικότητα και συνεχή διαχείριση των δεδομένων (Bibri & Huang, 2025).

Πέρα από τις παραπάνω εφαρμογές, ιδιαίτερη ανάπτυξη παρουσιάζουν τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα (*Large Language Models* -LLMs) και τα διαλογικά εργαλεία παραγωγικής ΤΝ. Τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν στους χρήστες να αλληλοεπιδρούν με ένα σύστημα μέσω φυσικής γλώσσας και να του παρέχουν κείμενα, πίνακες, εικόνες ή άλλες μορφές πληροφοριών. Στον κατασκευαστικό κλάδο, τα μοντέλα GPT (Generative Pre-trained Transformer) έχουν εξεταστεί ως προς τη δυνατότητά τους να συνθέτουν τεχνικές πληροφορίες, να οργανώνουν εναλλακτικές επιλογές, να υποστηρίζουν την επιλογή υλικών και να συμβάλλουν σε προκαταρκτικές διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Οι σχετικές εφαρμογές παραμένουν, ωστόσο, περισσότερο περιορισμένες σε σύγκριση με άλλες μορφές ΤΝ και απαιτούν περαιτέρω αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες έργων (Saka et al., 2024).

Τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για περισσότερο εξειδικευμένες εργασίες, όταν συνδέονται με δομημένα δεδομένα και σαφώς οργανωμένα πρωτόκολλα. Ενδεικτικά, έχουν αναπτυχθεί πλαίσια στα οποία ένα LLM (Large Language Model) ερμηνεύει κανονιστικές απαιτήσεις, επιλέγει τα αναγκαία δεδομένα από ένα μοντέλο BIM (Building Information Modeling), εκτελεί ελέγχους και παράγει αναφορές συμμόρφωσης. Τέτοιες εφαρμογές δείχνουν ότι τα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να υπερβούν τη γενική παραγωγή κειμένου, όταν λειτουργούν μέσα σε ένα ελεγχόμενο σύστημα με συγκεκριμένες πηγές, εργαλεία και διαδικασίες επαλήθευσης (Iversen & Huang, 2026).

Η ευχέρεια των μεγάλων γλωσσικών μοντέλων να παράγουν συνεκτικό και πειστικό λόγο δεν εξασφαλίζει, εντούτοις, την πραγματολογική ή τεχνική ακρίβεια των απαντήσεών τους. Τα μοντέλα ενδέχεται να παράγουν πληροφορίες που φαίνονται εύλογες αλλά δεν υποστηρίζονται από τα διαθέσιμα δεδομένα, φαινόμενο που στη σχετική βιβλιογραφία περιγράφεται ως «παραίσθηση» (*hallucination*). Ενδέχεται επίσης να παραλείψουν σημαντικούς περιορισμούς, να χρησιμοποιήσουν μη επικαιροποιημένη γνώση ή να παρουσιάσουν ως βέβαιες προτάσεις που στην πραγματικότητα απαιτούν αυτοψία, μέτρηση ή ειδικό τεχνικό υπολογισμό. Για τον λόγο αυτό, οι απαντήσεις τους πρέπει να αντιμετωπίζονται ως προκαταρκτικό υλικό προς έλεγχο και όχι ως αυτοτελής τεχνική τεκμηρίωση (Huang et al., 2023; Tonmoy et al., 2024).

Παράλληλα με τις τεχνικές εξελίξεις, αναδεικνύονται ζητήματα διαφάνειας, αλγοριθμικής μεροληψίας, προστασίας δεδομένων, πνευματικής ιδιοκτησίας και κατανομής της επαγγελματικής ευθύνης. Στην αρχιτεκτονική, οι προβληματισμοί αυτοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί, καθώς οι σχεδιαστικές αποφάσεις δεν αφορούν μόνο μετρήσιμες τεχνικές επιδόσεις, αλλά και αξίες όπως η ασφάλεια, η προσβασιμότητα, η πολιτισμική ταυτότητα, η ευημερία και η κοινωνική ένταξη. Η τεχνική βελτιστοποίηση δεν μπορεί, επομένως, να αποτελέσει το μοναδικό κριτήριο αξιολόγησης μιας πρότασης. Η χρήση ΤΝ χρειάζεται να εντάσσεται σε μια διαδικασία όπου ο μελετητής διατηρεί την ευθύνη για τον καθορισμό των στόχων, την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την τελική απόφαση (Albukhari, 2025).

1.3 Σκοπός, ερευνητικά ερωτήματα και στόχοι της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται στο σημείο τομής ανάμεσα στη συζήτηση για τη βιωσιμότητα των σχολικών κτιρίων και αυλών και στην αυξανόμενη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στις διαδικασίες σχεδιασμού, ανάλυσης και λήψης αποφάσεων στον κλάδο της αρχιτεκτονικής και των κατασκευών. Οι συστηματικές ανασκοπήσεις σχετικά με την ΤΝ στα βιώσιμα και πράσινα κτίρια καταγράφουν εφαρμογές που εκτείνονται από τον αρχικό σχεδιασμό και την ενεργειακή βελτιστοποίηση έως την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση των κτιρίων (Adewale et al., 2024; Debrah et al., 2022). Παράλληλα, η βιβλιογραφία για τις σχολικές αυλές επικεντρώνεται κυρίως στο μικροκλίμα, στη σκίαση, στη θερμική άνεση των παιδιών και στη βελτίωση των υπαίθριων συνθηκών μέσω σχεδιαστικών παρεμβάσεων (Antoniadis et al., 2020; Binabid et al., 2024). Η παράλληλη εξέταση των δύο πεδίων υποδεικνύει ότι η χρήση εργαλείων παραγωγικής ΤΝ για την επεξεργασία πραγματικού αρχιτεκτονικού υλικού και την παραγωγή προκαταρκτικών σεναρίων βιοκλιματικής αναβάθμισης σχολικών υποδομών παραμένει λιγότερο συστηματικά διερευνημένη.

Σε αυτό το πλαίσιο, γενικός σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα του ChatGPT και του Gemini να υποστηρίξουν τη διαμόρφωση εναλλακτικών σεναρίων για τη βιοκλιματική αναβάθμιση της νότιας ζώνης του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου και να συγκριθεί η ποιότητα των παραγόμενων προτάσεων βάσει κοινού πλαισίου τεχνικών, βιοκλιματικών και αρχιτεκτονικών κριτηρίων. Ως νότια ζώνη νοούνται η νότια όψη του εξεταζόμενου σχολικού κτιρίου, οι αίθουσες και τα ανοίγματα που

συνδέονται άμεσα με αυτήν και, στον βαθμό που το διαθέσιμο υλικό επιτρέπει ασφαλείς παρατηρήσεις, ο άμεσα γειτονικός υπαίθριος χώρος. Η εργασία δεν αντιμετωπίζει τα δύο μοντέλα ως αυτόνομους αρχιτεκτονικούς σχεδιαστές, αλλά ως εργαλεία υποστήριξης της προκαταρκτικής οργάνωσης και διερεύνησης ενός πραγματικού σχεδιαστικού προβλήματος. Η συγκεκριμένη οριοθέτηση ανταποκρίνεται στο τελικό εμπειρικό πεδίο της εργασίας.

Για τη διαμόρφωση συγκρίσιμων συνθηκών, τα δύο εργαλεία λαμβάνουν κοινό πληροφοριακό υλικό, το οποίο περιλαμβάνει αρχιτεκτονικά σχέδια, φωτογραφίες, τεχνικές περιγραφές, στοιχεία της υφιστάμενης κατάστασης και βασικές κλιματικές πληροφορίες. Κάθε εργαλείο παράγει δύο διακριτά επίπεδα παρέμβασης: ένα σενάριο ελάχιστης και περισσότερο άμεσα εφαρμόσιμης παρέμβασης και ένα σενάριο ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης. Συνολικά, επομένως, εξετάζονται τέσσερα σενάρια, τα οποία δεν αποτελούν τελικές τεχνικές μελέτες, αλλά προκαταρκτικές κατευθύνσεις προς συγκριτική αξιολόγηση.

Με βάση τον παραπάνω σκοπό, η εργασία οργανώνεται γύρω από τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

1. **Ποια εναλλακτικά σενάρια προτείνουν το ChatGPT και το Gemini για τη βιοκλιματική αναβάθμιση της νότιας ζώνης του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου;**
2. **Σε ποιον βαθμό τα παραγόμενα σενάρια αξιοποιούν ορθά το διαθέσιμο αρχιτεκτονικό, τεχνικό και κλιματικό υλικό και ανταποκρίνονται στις αρχές του βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού που αναπτύσσονται στο θεωρητικό μέρος της εργασίας;**
3. **Ποιες ομοιότητες και διαφορές παρουσιάζουν τα σενάρια του ChatGPT και του Gemini ως προς το είδος, την έκταση και την ιεράρχηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων;**
4. **Σε ποιον βαθμό τα τέσσερα σενάρια ανταποκρίνονται στα κριτήρια της αξιοποίησης του διαθέσιμου πληροφοριακού υλικού, της βιοκλιματικής καταλληλότητας, της τεχνικής εφαρμοσιμότητας, της αρχιτεκτονικής συμβατότητας και της τεκμηρίωσης και αναγνώρισης των περιορισμών;**

Τα ερευνητικά ερωτήματα εξειδικεύονται μέσω ενός συνόλου στόχων, οι οποίοι οργανώνονται σε τρία διακριτά αλλά αλληλοσυμπληρούμενα επίπεδα.

Στο πρώτο, θεωρητικό επίπεδο, η εργασία επιδιώκει:

- να ανασκοπήσει και να συστηματοποιήσει τη βιβλιογραφία σχετικά με τη βιωσιμότητα των κτιρίων και ειδικότερα των σχολικών κτιρίων και αυλών, με έμφαση στην ενεργειακή απόδοση, στην ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, στο μικροκλίμα και στη θερμική άνεση,
- να χαρτογραφήσει τις βασικές εφαρμογές της ΤΝ στον κλάδο της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και των κατασκευών, με έμφαση στον βιώσιμο σχεδιασμό, στην παραγωγή εναλλακτικών λύσεων και στη διαχείριση της τεχνικής πληροφορίας,
- να εξετάσει τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των μεγάλων γλωσσικών μοντέλων ως εργαλείων προκαταρκτικής υποστήριξης του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού,
- να αναδείξει τις ηθικές, νομικές, κοινωνικές και επαγγελματικές διαστάσεις της χρήσης ΤΝ σε αποφάσεις που αφορούν το δομημένο περιβάλλον και, ειδικότερα, τις εκπαιδευτικές υποδομές.

Στο δεύτερο, εμπειρικό επίπεδο, η εργασία στοχεύει:

- να αναλύσει την υφιστάμενη κατάσταση της νότιας ζώνης του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου με βάση το διαθέσιμο αρχιτεκτονικό, φωτογραφικό και τεχνικό υλικό,
- να εξετάσει τον τρόπο με τον οποίο το ChatGPT και το Gemini ερμηνεύουν ένα κοινό πληροφοριακό πακέτο και εντοπίζουν τα βασικά βιοκλιματικά και τεχνικά ζητήματα της εξεταζόμενης ζώνης,
- να παραγάγει, μέσω των δύο μοντέλων, τέσσερα προκαταρκτικά σενάρια παρέμβασης, δηλαδή ένα ελάχιστο και ένα ολοκληρωμένο σενάριο από κάθε εργαλείο,
- να συγκρίνει τα παραγόμενα σενάρια ως προς το είδος, την έκταση και την ιεράρχηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων,

- να αξιολογήσει τα τέσσερα σενάρια βάσει κοινού πλαισίου πέντε ισοβαρών κριτηρίων και να συνοδεύσει την αριθμητική βαθμολόγηση με ποιοτική και τεχνική αιτιολόγηση.

Στο τρίτο, συνθετικό και κριτικό επίπεδο, η εργασία αποσκοπεί:

- να αποτιμήσει τη συμβολή των δύο εργαλείων στην οργάνωση ενός σύνθετου αρχιτεκτονικού προβλήματος και στην παραγωγή εναλλακτικών κατευθύνσεων,
- να εντοπίσει τις αδυναμίες των παραγόμενων απαντήσεων, ιδιαίτερα ως προς τις μη επιβεβαιωμένες παραδοχές, την τεχνική εφαρμοσιμότητα και τη διαχείριση της αβεβαιότητας,
- να εξετάσει τη χρησιμότητα του κριτικού αυτοελέγχου των μοντέλων, χωρίς να τον εξομοιώνει με ανεξάρτητη τεχνική επαλήθευση,
- να προσδιορίσει τις αυτοψίες, τις μετρήσεις, τις προσομοιώσεις και τις εξειδικευμένες μελέτες που απαιτούνται πριν από την επιλογή ή την εφαρμογή οποιασδήποτε παρέμβασης,
- να διατυπώσει κατευθύνσεις για την υπεύθυνη και ελεγχόμενη αξιοποίηση της παραγωγικής ΤΝ κατά τα πρώιμα στάδια του βιώσιμου αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

1.4 Αντικείμενο και πεδίο της μελέτης

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εστιάζει στη διερεύνηση της συμβολής εργαλείων παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαμόρφωση προκαταρκτικών σεναρίων βιώσιμου και βιοκλιματικού επανασχεδιασμού σχολικών υποδομών. Η ΤΝ δεν εξετάζεται μόνο σε θεωρητικό και αφηρημένο επίπεδο, αλλά μέσα από την εφαρμογή δύο συγκεκριμένων εργαλείων, του ChatGPT και του Gemini, σε ένα πραγματικό αρχιτεκτονικό πρόβλημα. Σκοπός είναι να εξεταστεί κατά πόσο τα δύο μοντέλα μπορούν να αξιοποιήσουν διαθέσιμες αρχιτεκτονικές, τεχνικές και κλιματικές πληροφορίες, να εντοπίσουν βασικά ζητήματα της υφιστάμενης κατάστασης και να διαμορφώσουν εναλλακτικές κατευθύνσεις παρέμβασης.

Ως μελέτη περίπτωσης επιλέγεται το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο Αγρινίου, το οποίο αποτελεί τμήμα του ιστορικού συγκροτήματος των Παπαστρατειών Εκπαιδευτηρίων. Η

επιλογή του βασίζεται στην ιστορική και αρχιτεκτονική σημασία του κτιρίου, στη συνεχιζόμενη χρήση του ως εκπαιδευτικής μονάδας και στη διαθεσιμότητα αρχιτεκτονικών σχεδίων, φωτογραφικού υλικού και τεχνικών πληροφοριών. Η περίπτωση δεν αντιμετωπίζεται, επομένως, ως ένα απολύτως «τυπικό» σχολείο, αλλά ως ιστορικό κτίριο με ιδιαίτερη αρχιτεκτονική φυσιογνωμία, η οποία πρέπει να συνεκτιμηθεί κατά την αξιολόγηση των παρεμβάσεων.

Παρότι το θεωρητικό μέρος εξετάζει συνολικά τη βιωσιμότητα των σχολικών κτιρίων και των υπαίθριων εκπαιδευτικών χώρων, το εμπειρικό πεδίο της έρευνας περιορίζεται στη νότια ζώνη του 5ου Δημοτικού Σχολείου. Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στη διαμόρφωση ενός σαφώς οριοθετημένου και διαχειρίσιμου σχεδιαστικού προβλήματος. Μια ολοκληρωμένη μελέτη ολόκληρου του συγκροτήματος και της αυλής θα απαιτούσε εκτεταμένη επικαιροποιημένη αποτύπωση, ενεργειακές και μικροκλιματικές προσομοιώσεις, μετρήσεις εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, πλήρη καταγραφή των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων και αναλυτική εξέταση των χρήσεων και των κινήσεων στον αύλειο χώρο. Τα στοιχεία αυτά δεν είναι διαθέσιμα στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

Ο όρος «νότια ζώνη» χρησιμοποιείται αντί του στενότερου όρου «νότια όψη», επειδή η βιοκλιματική λειτουργία δεν εξαρτάται μόνο από την εξωτερική μορφή του κελύφους. Το χωρικό πεδίο της διερεύνησης περιλαμβάνει:

- τη νότια όψη του κτιρίου,
- τα νότια ανοίγματα του ισόγειου και του πρώτου ορόφου,
- τις αίθουσες και τους λοιπούς εσωτερικούς χώρους που συνδέονται άμεσα με τα συγκεκριμένα ανοίγματα,
- τα υφιστάμενα στοιχεία σκίασης και αερισμού που επηρεάζουν τη λειτουργία της ζώνης,
- τον άμεσα γειτονικό εξωτερικό χώρο, μόνο στον βαθμό που αποτυπώνεται επαρκώς στο διαθέσιμο υλικό.

Η συγκεκριμένη ζώνη επιλέγεται επειδή συγκεντρώνει βασικές παραμέτρους του βιοκλιματικού σχεδιασμού, όπως ο έλεγχος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η διατήρηση επαρκούς φυσικού φωτισμού, η αξιοποίηση του φυσικού αερισμού και η

διαμόρφωση συνθηκών θερμικής άνεσης. Οι παράμετροι αυτές εξετάζονται συνδυαστικά, καθώς μια παρέμβαση σε μία από αυτές μπορεί να επηρεάσει θετικά ή αρνητικά τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, η ενίσχυση της σκίασης μπορεί να μειώσει τη θερμική ηλιακή επιβάρυνση, αλλά, εάν δεν σχεδιαστεί κατάλληλα, μπορεί να περιορίσει τον φυσικό φωτισμό των αιθουσών. Αντίστοιχα, η αύξηση του αερισμού δεν εξασφαλίζει αυτομάτως θερμική άνεση όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα υψηλές. Για τον λόγο αυτό, οι προτάσεις αντιμετωπίζονται ως συνδυασμένες βιοκλιματικές στρατηγικές και όχι ως απομονωμένα τεχνικά μέτρα.

Ο άμεσα συνδεδεμένος υπαίθριος χώρος λαμβάνεται υπόψη ως τμήμα της περιβαλλοντικής λειτουργίας της νότιας ζώνης και ως πιθανό πεδίο περιορισμένων και κατά το δυνατόν αναστρέψιμων παρεμβάσεων, όπως η προσθήκη φυτεύσεων σκίασης, η τοπική βελτίωση των επιφανειών ή η τοποθέτηση ελαφρών στοιχείων ηλιοπροστασίας. Δεν εξετάζεται, όμως, ως αυτοτελές αντικείμενο συνολικού επανασχεδιασμού της σχολικής αυλής. Τα διαθέσιμα στοιχεία δεν παρέχουν πλήρη και επικαιροποιημένη αποτύπωση της υφιστάμενης φύτευσης, των υλικών, των υψομετρικών διαφορών, των δικτύων, των καθημερινών διαδρομών και των λειτουργικών ζωνών του προαυλίου.

Ως προς την Τεχνητή Νοημοσύνη, η εμπειρική έρευνα περιορίζεται στα ChatGPT και Gemini. Τα δύο εργαλεία αξιοποιούνται ως διαλογικά συστήματα παραγωγής και οργάνωσης προκαταρκτικών σεναρίων και όχι ως εξειδικευμένα λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης, παραμετρικού σχεδιασμού ή αυτόματης παραγωγής κατασκευαστικών σχεδίων. Δεν πραγματοποιείται άμεση σύνδεση των μοντέλων με BIM, ψηφιακά δίδυμα, γενετικούς αλγορίθμους ή περιβάλλοντα δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης. Οι σχετικές τεχνολογίες εξετάζονται στο θεωρητικό μέρος, επειδή αποτελούν σημαντικές εφαρμογές της TN στον δομημένο χώρο, αλλά δεν αποτελούν εργαλεία της συγκεκριμένης ερευνητικής διαδικασίας.

Τα δύο μοντέλα λαμβάνουν κοινό πληροφοριακό υλικό και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τεσσάρων συνολικά σεναρίων: ενός σεναρίου ελάχιστης παρέμβασης και ενός σεναρίου ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης από κάθε εργαλείο. Το αντικείμενο της σύγκρισης δεν είναι η συνολική εμπορική ή τεχνολογική αξιολόγηση του ChatGPT και του Gemini, αλλά η ποιότητα των απαντήσεών τους υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες, με το συγκεκριμένο υλικό και το κοινό ερευνητικό πρωτόκολλο. Συνεπώς, τα

αποτελέσματα δεν μπορούν να γενικευτούν αυτομάτως σε όλες τις εκδόσεις ή σε όλες τις πιθανές χρήσεις των δύο εφαρμογών.

Οι κοινωνικές και παιδαγωγικές διαστάσεις της βιωσιμότητας διατηρούνται ως μέρος του θεωρητικού και ερμηνευτικού πλαισίου. Ωστόσο, η εργασία δεν περιλαμβάνει ερωτηματολόγια, συνεντεύξεις, συμμετοχικό σχεδιασμό ή συστηματική παρατήρηση της συμπεριφοράς μαθητών και εκπαιδευτικών. Δεν είναι, επομένως, δυνατό να αξιολογηθούν άμεσα η αντιληπτή άνεση, η ικανοποίηση των χρηστών, η πραγματική παιδαγωγική αξιοποίηση της αυλής ή η επίδραση των παρεμβάσεων στη σχολική εμπειρία. Οι παράμετροι αυτές εξετάζονται ως απαιτήσεις που θα έπρεπε να συνεκτιμηθούν σε μια πληρέστερη μελλοντική μελέτη και όχι ως εμπειρικά μετρημένα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.

Από το πεδίο της μελέτης εξαιρούνται επίσης:

- η συνολική ενεργειακή αναβάθμιση ολόκληρου του σχολικού συγκροτήματος,
- η πλήρης αναδιαμόρφωση της σχολικής αυλής,
- ο στατικός και αντισεισμικός έλεγχος,
- η αναλυτική εξέταση και διαστασιολόγηση των εγκαταστάσεων θέρμανσης, αερισμού και ψύξης,
- η πραγματοποίηση δυναμικής ενεργειακής ή μικροκλιματικής προσομοίωσης,
- η ακριβής ποσοτικοποίηση της ενεργειακής εξοικονόμησης ή της μεταβολής των εσωτερικών θερμοκρασιών,
- η αναλυτική κοστολόγηση και η ανάλυση κόστους κύκλου ζωής των λύσεων,
- η εκπόνηση οριστικής αρχιτεκτονικής, κατασκευαστικής ή ηλεκτρομηχανολογικής μελέτης.

Οι παραπάνω εξαιρέσεις δεν σημαίνουν ότι οι αντίστοιχοι έλεγχοι δεν είναι αναγκαίοι. Αντίθετα, αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις πριν από την εφαρμογή οποιασδήποτε πρότασης. Η παρούσα εργασία περιορίζεται στην προκαταρκτική αξιολόγηση του κατά πόσο οι προτάσεις των δύο εργαλείων είναι θεωρητικά και τεχνικά εύλογες, συνδέονται με τα διαθέσιμα στοιχεία του κτιρίου, ανταποκρίνονται στις βασικές αρχές του

βιοκλιματικού σχεδιασμού και αναγνωρίζουν την ανάγκη πρόσθετων δεδομένων, μετρήσεων και εξειδικευμένων μελετών.

Με αυτή την οριοθέτηση, η εργασία επιδιώκει να συμβάλει αφενός στη θεωρητική συζήτηση για τη σχέση Τεχνητής Νοημοσύνης, βιώσιμου σχεδιασμού και σχολικής αρχιτεκτονικής και αφετέρου στην πρακτική κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με συγκεκριμένους περιορισμούς και ανθρώπινο έλεγχο, κατά την προκαταρκτική διερεύνηση ενός πραγματικού αρχιτεκτονικού προβλήματος.

1.5 Συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογικής προσέγγισης

Η ερευνητική προσέγγιση της παρούσας διπλωματικής εργασίας διαμορφώθηκε ως συγκριτική μελέτη περίπτωσης με σχεδιαστικό προσανατολισμό. Η επιλογή αυτή επέτρεψε τη διερεύνηση της χρήσης εργαλείων παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης μέσα στο συγκεκριμένο αρχιτεκτονικό, ιστορικό και λειτουργικό πλαίσιο ενός πραγματικού σχολικού κτιρίου. Η μελέτη περίπτωσης είναι κατάλληλη για την εξέταση σύνθετων προβλημάτων του δομημένου περιβάλλοντος, καθώς επιτρέπει τη συνδυασμένη αξιοποίηση διαφορετικών μορφών τεκμηρίωσης και τη σύνδεση των θεωρητικών αρχών με τα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης περίπτωσης (Groat & Wang, 2013).

Ως μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο Αγρινίου και ειδικότερα η νότια ζώνη του κτιρίου. Η εμπειρική διερεύνηση επικεντρώθηκε στη νότια όψη, στους χώρους και στα ανοίγματα που συνδέονται άμεσα με αυτήν και, στον βαθμό που το διαθέσιμο υλικό επέτρεπε ασφαλείς παρατηρήσεις, στον άμεσα γειτονικό αύλειο χώρο. Η επιλογή της συγκεκριμένης ζώνης συνδέεται με ζητήματα ηλιακής έκθεσης, ηλιοπροστασίας, φυσικού φωτισμού, αερισμού και θερινής θερμικής άνεσης, αλλά και με την ανάγκη διατήρησης της αρχιτεκτονικής φυσιογνωμίας ενός ιστορικού σχολικού κτιρίου.

Για την τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης αξιοποιήθηκαν κατόψεις, όψεις, φωτογραφικό υλικό, τεχνικές και ιστορικές πληροφορίες και βασικά κλιματικά δεδομένα για την περιοχή του Αγρινίου. Το υλικό χρησιμοποιήθηκε για την αναγνώριση των βασικών μορφολογικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του κτιρίου, των υφιστάμενων μέσων σκίασης και αερισμού και των περιορισμών που θα έπρεπε να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαμόρφωση πιθανών παρεμβάσεων. Η ανάλυση αυτή

παρέμεινε προκαταρκτική, καθώς δεν υπήρχαν επιτόπιες περιβαλλοντικές μετρήσεις, πλήρη στοιχεία ενεργειακής κατανάλωσης ή αναλυτικά δεδομένα για τις θερμοφυσικές και κατασκευαστικές ιδιότητες του κελύφους.

Με βάση το διαθέσιμο υλικό συγκροτήθηκε κοινό πληροφοριακό πακέτο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις εφαρμογές ChatGPT και Gemini. Τα δύο εργαλεία κλήθηκαν να αναλύσουν το ίδιο αρχιτεκτονικό πρόβλημα και να διαμορφώσουν δύο επίπεδα παρέμβασης: ένα σενάριο ελάχιστης και περισσότερο άμεσα εφαρμόσιμης παρέμβασης και ένα σενάριο ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης. Συνολικά παράχθηκαν τέσσερα σενάρια, δύο από κάθε εφαρμογή. Οι απαντήσεις των εργαλείων διατηρήθηκαν αυτούσιες, ώστε η αξιολόγηση να περιλαμβάνει τόσο τις προτάσεις τους όσο και τις πιθανές παραλείψεις, ασάφειες ή μη επαρκώς τεκμηριωμένες παραδοχές.

Η αλληλεπίδραση με τα δύο εργαλεία οργανώθηκε με κοινό κορμό οδηγιών. Αρχικά ζητήθηκε η ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης, στη συνέχεια η παραγωγή των δύο σεναρίων και, τέλος, η ιεράρχηση και κριτική επανεξέταση των προτεινόμενων παρεμβάσεων. Στο τελευταίο στάδιο τα μοντέλα κλήθηκαν να διακρίνουν τις προτάσεις που στηρίζονταν άμεσα στο διαθέσιμο υλικό από εκείνες που βασίζονταν σε υποθέσεις ή απαιτούσαν πρόσθετη αυτοψία, μέτρηση ή τεχνική μελέτη. Ο αυτοέλεγχος αυτός χρησιμοποιήθηκε ως στοιχείο της συγκριτικής ανάλυσης, χωρίς να θεωρηθεί ανεξάρτητη επιβεβαίωση της τεχνικής εγκυρότητας των απαντήσεων, δεδομένου ότι τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να παράγουν πειστικές αλλά ανακριβείς ή ανεπαρκώς τεκμηριωμένες πληροφορίες (Huang et al., 2023; Tonmoy et al., 2024).

Τα τέσσερα σενάρια αξιολογήθηκαν μέσω κοινού πλαισίου πέντε κριτηρίων: αξιοποίηση του διαθέσιμου πληροφοριακού υλικού, βιοκλιματική καταλληλότητα, τεχνική εφαρμοσιμότητα, αρχιτεκτονική συμβατότητα και τεκμηρίωση και αναγνώριση των περιορισμών. Χρησιμοποιήθηκε ενιαία πενταβάθμια κλίμακα και ίση στάθμιση των κριτηρίων, ενώ κάθε αριθμητική βαθμολογία συνοδεύτηκε από ποιοτική και τεχνική αιτιολόγηση. Η βαθμολόγηση λειτούργησε ως μέσο συστηματικής οργάνωσης της σύγκρισης και όχι ως αντικειμενική ή στατιστικά επικυρωμένη μέτρηση της συνολικής απόδοσης των δύο εφαρμογών.

Η συγκριτική ανάλυση εξέτασε τόσο τη μετάβαση κάθε εργαλείου από την ελάχιστη προς την ολοκληρωμένη παρέμβαση όσο και τις ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των

αντίστοιχων σεναρίων του ChatGPT και του Gemini. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον τρόπο αξιοποίησης των στοιχείων του κτιρίου, στην έκταση και στην ιεράρχηση των προτάσεων, στην αναγνώριση των τεχνικών προϋποθέσεων και στη διαχείριση της αβεβαιότητας.

Η μεθοδολογική προσέγγιση διακρίνει σαφώς την προκαταρκτική σχεδιαστική διερεύνηση από την τεχνική επαλήθευση. Δεν πραγματοποιήθηκαν ενεργειακές ή μικροκλιματικές προσομοιώσεις, επιτόπιες μετρήσεις, στατικός ή ηλεκτρομηχανολογικός έλεγχος, αναλυτική κοστολόγηση ή οριστική μελέτη εφαρμογής. Τα σενάρια εξετάστηκαν, επομένως, ως κατευθύνσεις που μπορούν να υποστηρίξουν την αρχική οργάνωση του προβλήματος και τον προσδιορισμό των απαιτούμενων επόμενων ελέγχων, χωρίς να αντιμετωπίζονται ως ολοκληρωμένες ή έτοιμες προς εφαρμογή λύσεις.

1.6 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας ακολουθεί μια σταδιακή πορεία από το γενικό θεωρητικό πλαίσιο προς την ειδική εμπειρική διερεύνηση και, στη συνέχεια, προς τη σύνθεση των αποτελεσμάτων και τη διατύπωση των συμπερασμάτων. Κάθε κεφάλαιο επιτελεί διακριτό ρόλο, αλλά συνδέεται με τα προηγούμενα και τα επόμενα, ώστε να διατηρείται η συνοχή ανάμεσα στο αντικείμενο, στα ερευνητικά ερωτήματα, στη μεθοδολογία και στα ευρήματα της εργασίας. Η εργασία οργανώνεται συνολικά σε οκτώ κεφάλαια.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται το εισαγωγικό πλαίσιο της εργασίας. Αρχικά αναπτύσσεται η σημασία της βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα και ειδικότερα στα σχολικά κτίρια και στους υπαίθριους εκπαιδευτικούς χώρους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές κατηγορίες εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης στην αρχιτεκτονική και στις κατασκευές, με ιδιαίτερη αναφορά στα εργαλεία παραγωγικής ΤΝ και στα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα. Ακολουθούν η διατύπωση του σκοπού, των ερευνητικών ερωτημάτων και των στόχων, η οριοθέτηση του αντικειμένου και του πεδίου της μελέτης και η συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογικής προσέγγισης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την περιγραφή της δομής της εργασίας και λειτουργεί ως οδηγός για την κατανόηση της συνολικής ερευνητικής πορείας.

Το **Κεφάλαιο 2** συγκροτεί το θεωρητικό πλαίσιο σχετικά με τη βιωσιμότητα, τη σχολική αρχιτεκτονική και τα εκπαιδευτικά περιβάλλοντα. Παρουσιάζονται οι βασικές διαστάσεις

της βιωσιμότητας στα κτίρια, οι αρχές της βιώσιμης αρχιτεκτονικής και του βιοκλιματικού σχεδιασμού και η σημασία της ανάλυσης του κύκλου ζωής. Στη συνέχεια εξετάζονται τα σχολικά κτίρια ως ιδιαίτερη κατηγορία του δομημένου περιβάλλοντος, με έμφαση στην ενεργειακή απόδοση, στην ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, στην υγεία και στη μαθησιακή εμπειρία των χρηστών. Ιδιαίτερη προσοχή αποδίδεται στις σχολικές αυλές ως μικροκλιματικούς, κοινωνικούς και παιδαγωγικούς χώρους, καθώς και σε ζητήματα υπαίθριας μάθησης, βιοφιλικού σχεδιασμού, ασφάλειας, προσβασιμότητας και συμπερίληψης. Το κεφάλαιο καταλήγει στη συστηματοποίηση περιβαλλοντικών, μικροκλιματικών, λειτουργικών και κοινωνικο-παιδαγωγικών κριτηρίων, τα οποία διαμορφώνουν το ευρύτερο θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας.

Το **Κεφάλαιο 3** εξετάζει την Τεχνητή Νοημοσύνη στον τομέα του δομημένου περιβάλλοντος. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες και αρχές λειτουργίας της ΤΝ, όπως η μηχανική μάθηση, η βαθιά μάθηση, τα παραγωγικά μοντέλα και τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα. Στη συνέχεια αναλύονται εφαρμογές της ΤΝ στα διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου, από τον αρχικό σχεδιασμό και την κατασκευή έως τη λειτουργία και τη συντήρηση. Εξετάζονται επίσης η σχέση της ΤΝ με τη Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου, ο παραγωγικός και πολυκριτηριακός σχεδιασμός, τα ψηφιακά δίδυμα και η χρήση μεγάλων γλωσσικών μοντέλων για την επεξεργασία τεχνικής πληροφορίας και την υποστήριξη προκαταρκτικών αποφάσεων. Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζονται ως μέρος του ευρύτερου θεωρητικού πλαισίου, χωρίς να θεωρείται ότι εφαρμόζονται όλες στο εμπειρικό μέρος της εργασίας.

Το **Κεφάλαιο 4** αναπτύσσει τις ηθικές, νομικές και κοινωνικές διαστάσεις της Τεχνητής Νοημοσύνης στην αρχιτεκτονική και στις κατασκευές. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της υπεύθυνης και αξιόπιστης ΤΝ και εξετάζονται ζητήματα όπως η διαφάνεια, η επαληθευσιμότητα, η λογοδοσία, η προστασία των προσωπικών δεδομένων, οι αλγοριθμικές μεροληψίες, η πνευματική ιδιοκτησία και η κατανομή της επαγγελματικής ευθύνης. Παράλληλα, αναλύεται η ανάγκη διατήρησης ανθρώπινης εποπτείας όταν τα εργαλεία ΤΝ χρησιμοποιούνται σε αποφάσεις που αφορούν την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και την ποιότητα του δομημένου περιβάλλοντος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα σχολικά περιβάλλοντα, όπου οι προτεινόμενες λύσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις ανάγκες, τα δικαιώματα και την ευημερία των παιδιών. Το κεφάλαιο παρέχει το

αναγκαίο κριτικό πλαίσιο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων στο εμπειρικό μέρος.

Το **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζει αναλυτικά τη μεθοδολογία της έρευνας. Η εμπειρική διερεύνηση οργανώνεται ως συγκριτική μελέτη περίπτωσης με σχεδιαστικό προσανατολισμό και επικεντρώνεται στη νότια ζώνη του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου. Τεκμηριώνονται η επιλογή και η οριοθέτηση της περίπτωσης, παρουσιάζεται το διαθέσιμο αρχιτεκτονικό, τεχνικό, φωτογραφικό και κλιματικό υλικό και εξηγείται η επιλογή του ChatGPT και του Gemini. Περιγράφονται οι κοινές συνθήκες χρήσης των δύο εργαλείων, η συγκρότηση του πληροφοριακού πακέτου και η διαδικασία υποβολής των κοινών οδηγιών. Κάθε μοντέλο καλείται να αναλύσει την υφιστάμενη κατάσταση, να παραγάγει ένα σενάριο ελάχιστης παρέμβασης και ένα σενάριο ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης και να πραγματοποιήσει ιεράρχηση και κριτικό αυτοέλεγχο των προτάσεών του.

Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης των τεσσάρων σεναρίων. Η αξιολόγηση βασίζεται σε πέντε ισοβαρή κριτήρια: αξιοποίηση του διαθέσιμου πληροφοριακού υλικού, βιοκλιματική καταλληλότητα, τεχνική εφαρμοσιμότητα, αρχιτεκτονική συμβατότητα και τεκμηρίωση και αναγνώριση των περιορισμών. Παρουσιάζονται επίσης η κλίμακα βαθμολόγησης, η ποιοτική αξιολόγηση των επιμέρους παρεμβάσεων και τα μέτρα που λήφθηκαν για την ενίσχυση της διαφάνειας, της εγκυρότητας και της συγκρισιμότητας της διαδικασίας. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των βασικών περιορισμών της έρευνας.

Το **Κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει την παρουσίαση και τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Αρχικά καταγράφεται η εφαρμογή του ερευνητικού πρωτοκόλλου και παρουσιάζονται οι συνθήκες υπό τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν το ChatGPT και το Gemini. Στη συνέχεια συγκρίνονται οι αναλύσεις των δύο μοντέλων για την υφιστάμενη κατάσταση της νότιας ζώνης. Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των δύο σεναρίων του ChatGPT και των δύο σεναρίων του Gemini και η καταγραφή των προτεινόμενων παρεμβάσεων.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου πραγματοποιείται η σύγκριση των τεσσάρων σεναρίων ως προς τα βασικά πεδία παρέμβασης, τη λογική του σχεδιασμού και τον βαθμό σύνδεσης των προτάσεων με το διαθέσιμο υλικό. Τα σενάρια βαθμολογούνται βάσει των πέντε

προκαθορισμένων κριτηρίων και κάθε επιμέρους παρέμβαση ταξινομείται ανάλογα με τον βαθμό εφαρμοσιμότητάς της. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη σύγκριση της ιεράρχησης και του κριτικού αυτοελέγχου των δύο μοντέλων, ώστε να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο αναγνωρίζουν τις υποθέσεις, τις αβεβαιότητες και τις ανάγκες περαιτέρω τεχνικής διερεύνησης. Η πραγματική διάρθρωση του κεφαλαίου περιλαμβάνει την εφαρμογή του πρωτοκόλλου, τις αναλύσεις της υφιστάμενης κατάστασης, την παρουσίαση των τεσσάρων σεναρίων, τη συγκριτική αξιολόγηση και τον αυτοέλεγχο των μοντέλων.

Το **Κεφάλαιο 7** αποτελεί το βασικό συνθετικό μέρος της εργασίας και περιλαμβάνει τη συζήτηση των αποτελεσμάτων, τις απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα και τα συμπεράσματα. Αρχικά, τα ευρήματα της συγκριτικής ανάλυσης συνδέονται με το θεωρητικό πλαίσιο της βιώσιμης αρχιτεκτονικής, της παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης και της συνεργασίας ανθρώπου και υπολογιστικού συστήματος. Εξετάζεται η δυνατότητα του ChatGPT και του Gemini να οργανώσουν το διαθέσιμο πληροφοριακό υλικό, να παράγουν συγκρίσιμες σχεδιαστικές κατευθύνσεις και να υποστηρίξουν την προκαταρκτική διερεύνηση ενός πραγματικού προβλήματος βιοκλιματικής αναβάθμισης. Παράλληλα, αναλύονται οι διαφοροποιήσεις των δύο εργαλείων ως προς τη συγκεκριμενοποίηση των προτάσεων, τη διαχείριση της αβεβαιότητας και την αναγνώριση των τεχνικών προϋποθέσεων. Στη συνέχεια, δίνονται διακριτές απαντήσεις στα τέσσερα ερευνητικά ερωτήματα και παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες και τα όρια των μεγάλων γλωσσικών μοντέλων στον προκαταρκτικό βιώσιμο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Το **Κεφάλαιο 8** περιλαμβάνει τις θεωρητικές και πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων, τους περιορισμούς της έρευνας και τις προτάσεις για τη μελλοντική έρευνα και πρακτική αξιοποίηση. Αρχικά, παρουσιάζεται η θεωρητική συμβολή των ευρημάτων στην κατανόηση του βοηθητικού και συνεργατικού ρόλου της παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης κατά τα πρώιμα στάδια του σχεδιασμού. Παράλληλα, εξετάζονται οι δυνατότητες πρακτικής εφαρμογής της μεθοδολογίας στην οργάνωση πληροφοριακού υλικού, στην παραγωγή διαβαθμισμένων σεναρίων και στην προετοιμασία της διεπιστημονικής τεχνικής αξιολόγησης. Ακολουθεί η παρουσίαση των μεθοδολογικών, τεχνικών και πρακτικών περιορισμών της έρευνας, οι οποίοι αφορούν, μεταξύ άλλων, την επιλογή μίας μελέτης περίπτωσης, την απουσία επιτόπιων μετρήσεων και

προσομοιώσεων, την περιορισμένη τεχνική τεκμηρίωση και τον υποκειμενικό χαρακτήρα της αξιολόγησης. Τέλος, διατυπώνονται προτάσεις για τη διεύρυνση των μελετών περίπτωσης, την επανάληψη των δοκιμών, την εξέταση περισσότερων μοντέλων, τη σύνδεση των γλωσσικών εργαλείων με μετρήσεις, προσομοιώσεις και δομημένα δεδομένα, καθώς και την αξιολόγηση των προτάσεων από διεπιστημονική ομάδα ειδικών και από τους χρήστες των σχολικών χώρων.

Μετά τα οκτώ κύρια κεφάλαια ακολουθεί η βιβλιογραφία, στην οποία καταγράφονται οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη θεωρητική θεμελίωση, τη διαμόρφωση της μεθοδολογίας και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η εργασία ολοκληρώνεται με το παράρτημα, στο οποίο περιλαμβάνονται οι κατόψεις και οι όψεις του σχολικού κτιρίου, η φωτογραφική τεκμηρίωση και το συμπληρωματικό υλικό που υποστηρίζει την παρουσίαση και την αναπαραγωγιμότητα της ερευνητικής διαδικασίας.

2. Βιωσιμότητα, σχολική αρχιτεκτονική και εκπαιδευτικά περιβάλλοντα

Το δεύτερο κεφάλαιο συγκροτεί το θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας σε σχέση με τη βιωσιμότητα και το δομημένο περιβάλλον, με ιδιαίτερη έμφαση στη σχολική αρχιτεκτονική και τα εκπαιδευτικά περιβάλλοντα. Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της βιώσιμης κατασκευής, καθώς και οι κύριες τάσεις που διαμορφώνουν τη συζήτηση για τα «πράσινα» κτίρια. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα σχολικά κτίρια και οι αυλές ως ειδική τυπολογία, όπου συνυφαίνονται περιβαλλοντικές, λειτουργικές και παιδαγωγικές παράμετροι. Το κεφάλαιο καταλήγει στη διατύπωση κριτηρίων αξιολόγησης βιώσιμων σχολικών κτιρίων και αυλών, τα οποία θα αξιοποιηθούν στη μελέτη περίπτωσης.

2.1 Θεωρητικές προσεγγίσεις της βιωσιμότητας στα κτίρια

Η έννοια της βιωσιμότητας αναδείχθηκε δυναμικά στον διεθνή επιστημονικό και πολιτικό λόγο μετά τη δημοσίευση της Έκθεσης Brundtland *Our Common Future* από την Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (World Commission on Environment and Development - WCED). Στην έκθεση αυτή, η βιώσιμη ανάπτυξη ορίζεται ως «ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιούν τις δικές τους ανάγκες» (WCED, 1987), εισάγοντας ένα πλαίσιο στο οποίο περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές παράμετροι συνδέονται άρρηκτα.

Στη βάση αυτή, η προσέγγιση της τριπλής γραμμής βάσης (triple bottom line), όπως διατυπώθηκε από τον Elkington (1997), προτείνει την αξιολόγηση της επίδοσης ενός οργανισμού ή συστήματος με όρους «πλανήτη, ανθρώπων και κέρδους» (Planet, People, Profit), υπογραμμίζοντας ότι η οικονομική αποδοτικότητα οφείλει να συνεκτιμά τις κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Elkington, 1997; Conway, 2018). Στον κτιριακό τομέα, το πλαίσιο αυτό έχει επηρεάσει σημαντικά την ανάπτυξη πολιτικών και προτύπων για τα «πράσινα κτίρια», καθώς και συστημάτων αξιολόγησης όπως τα LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) και DGNB (Deutsche Gesellschaft für

Nachhaltiges Bauen), τα οποία επιχειρούν να αποτυπώσουν την περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική διάσταση της κτιριακής επίδοσης (Zuo & Zhao, 2014; Kibert, 2016).

Η εφαρμογή της βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα αν ληφθεί υπόψη ότι η κατασκευή και η λειτουργία κτιρίων ευθύνονται για σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και των αντίστοιχων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με στοιχεία του International Energy Agency (IEA) και του Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), τα κτίρια συνεισφέρουν περίπου στο ένα τρίτο της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και σε ανάλογο ποσοστό των ενεργειακά σχετιζόμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), εάν συμπεριληφθεί τόσο η λειτουργία όσο και η παραγωγή δομικών υλικών (IEA, 2021, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2023). Η μετατόπιση προς πιο βιώσιμες πρακτικές στον κτιριακό τομέα συνδέεται, επομένως, άμεσα με την επίτευξη διεθνών κλιματικών στόχων, όπως αυτοί αποτυπώνονται στη Συμφωνία των Παρισιών και στους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης, ιδίως στους SDG 11 και SDG 13.

Περιβαλλοντική διάσταση της βιωσιμότητας στα κτίρια

Η περιβαλλοντική διάσταση της βιωσιμότητας στα κτίρια αφορά την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Εστιάζει, μεταξύ άλλων, στην κατανάλωση ενέργειας και φυσικών πόρων, στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ρύπων, στη χρήση και τη μεταβολή της γης, στην κατανάλωση και ρύπανση νερού, στην παραγωγή αποβλήτων, αλλά και στην ποιότητα του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Στρατηγικές όπως ο βιοκλιματικός σχεδιασμός του κελύφους, η βελτιστοποίηση της θερμικής προστασίας, η αξιοποίηση φυσικού φωτισμού και αερισμού, η επιλογή υλικών με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και η ορθολογική διαχείριση νερού αποτελούν βασικά εργαλεία σε αυτή τη διάσταση (Kibert, 2016; Zuo & Zhao, 2014). Τα συστήματα πιστοποίησης πράσινων κτιρίων ενσωματώνουν πλήθος σχετικών δεικτών, με στόχο την ποσοτικοποίηση της περιβαλλοντικής επίδοσης και τη συγκρισιμότητα διαφορετικών λύσεων.

Οικονομική διάσταση: κόστος, αξία και κύκλος ζωής

Η οικονομική διάσταση της βιωσιμότητας στα κτίρια υπερβαίνει το στενό πλαίσιο του αρχικού κόστους κατασκευής και εξετάζει το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (total cost of

ownership) σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου. Η προσέγγιση της ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Costing- LCC) επιτρέπει τη συνεκτίμηση κόστους κατασκευής, λειτουργίας (ενέργεια, συντήρηση, καθαρισμός), επισκευών, αναβαθμίσεων και τελικής διαχείρισης (Dwaikat & Ali, 2018). Παράλληλα, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι τα βιώσιμα κτίρια μπορούν να παρουσιάζουν πρόσθετη οικονομική αξία μέσω μειωμένων λειτουργικών δαπανών, αύξησης της παραγωγικότητας και της υγείας των χρηστών, βελτιωμένης αγοραίας αξίας και μείωσης επενδυτικού κινδύνου (Kibert, 2016). Επομένως, η οικονομική διάσταση δεν βρίσκεται κατ' ανάγκην σε σύγκρουση με την περιβαλλοντική, εφόσον η ανάλυση γίνεται σε μακροχρόνιο ορίζοντα και σε βάση κύκλου ζωής.

Κοινωνική διάσταση: υγεία, ευημερία και δικαιοσύνη

Η κοινωνική διάσταση της βιωσιμότητας σχετίζεται με τον τρόπο που ο κτιριακός χώρος συμβάλλει στην υγεία, την ευημερία, την ασφάλεια, την προσβασιμότητα και την κοινωνική συνοχή. Στα κτίρια, αυτό μεταφράζεται σε ζητήματα ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος (θερμικής, οπτικής και ακουστικής άνεσης, ποιότητας αέρα), σε δυνατότητες ασφαλούς και χωρίς αποκλεισμούς πρόσβασης για όλους, στην ύπαρξη χώρων που ενθαρρύνουν την κοινωνική αλληλεπίδραση και στην ευαισθησία απέναντι στις ανάγκες ευάλωτων ομάδων. Στα εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, η κοινωνική διάσταση παίρνει ιδιαίτερο βάρος, καθώς το σχολικό κτίριο και οι υπαίθριοι χώροι του επηρεάζουν τη μάθηση, τη συγκέντρωση, την ψυχοκοινωνική ευημερία και το αίσθημα ένταξης των μαθητών. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, ο φυσικός φωτισμός, η ακουστική και η θερμική άνεση συσχετίζονται με την επίδοση, τις απουσίες και την αυτοαντίληψη των μαθητών (Turunen et al., 2014; Toyinbo et al., 2023; Pulimeno et al., 2020).

Ενεργειακή απόδοση ως κεντρική έννοια

Στην περιβαλλοντική διάσταση, η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων αποτελεί κεντρική έννοια. Αναφέρεται στην απαιτούμενη ενέργεια για τη διασφάλιση αποδεκτών συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης, αερισμού και λειτουργίας των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων, σε σχέση με προκαθορισμένα πρότυπα ή εναλλακτικές λύσεις. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης επιτυγχάνεται μέσω παθητικών στρατηγικών (προσανατολισμός, σκίαση, θερμομόνωση, εκμετάλλευση φυσικού φωτισμού και φυσικού

αερισμού) και ενεργητικών μέτρων (αποδοτικά συστήματα HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), φωτισμός υψηλής απόδοσης, αυτοματισμοί, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας). Δεδομένου ότι ο κτιριακός τομέας αποτελεί μεγάλο καταναλωτή ενέργειας, η μείωση της ζήτησης ενέργειας μέσω ενίσχυσης της ενεργειακής απόδοσης αναγνωρίζεται ως μία από τις πιο αποδοτικές στρατηγικές για τον περιορισμό εκπομπών και τη μετάβαση σε χαμηλού άνθρακα οικονομία (IEA, 2021).

Ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment - LCA)

Η έννοια του κύκλου ζωής και η αντίστοιχη μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment- LCA) προσφέρουν ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης κτιρίων και δομικών προϊόντων. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα International Organization for Standardization (ISO) 14040 και ISO 14044 (ISO, 2006), η LCA εξετάζει τις επιπτώσεις ενός προϊόντος ή συστήματος σε όλα τα στάδια: από την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, την παραγωγή και μεταφορά, έως την κατασκευή, τη χρήση, τη συντήρηση και την τελική διαχείριση (ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση ή διάθεση). Ο Οδηγός International Reference Life Cycle Data System (ILCD) (European Commission, 2010) προσφέρει επιπλέον μεθοδολογικές κατευθύνσεις για την εφαρμογή της LCA στην ευρωπαϊκή πρακτική. Στον κτιριακό τομέα, η LCA επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών υλικών, συστημάτων και διαμορφώσεων, αναδεικνύοντας, μεταξύ άλλων, τη συμβολή της «ενσωματωμένης ενέργειας» (embodied energy) και των εκπομπών που συνδέονται με τα υλικά σε σχέση με την ενέργεια λειτουργίας.

Ανθεκτικότητα (resilience) του δομημένου περιβάλλοντος

Η έννοια της ανθεκτικότητας (resilience) έχει αποκτήσει τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη σημασία στο πεδίο του δομημένου περιβάλλοντος, σε συνάρτηση με την κλιματική αλλαγή και την αυξανόμενη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων. Η ανθεκτικότητα ορίζεται ως η ικανότητα ενός συστήματος να απορροφά διαταραχές, να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και να διατηρεί ή να ανακτά κρίσιμες λειτουργίες μετά από ένα σοκ (Meerow, Newell & Stults, 2016). Στα κτίρια και στα αστικά σύνολα, η έννοια αυτή μεταφράζεται σε στρατηγικές σχεδιασμού που λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο τις μέσες κλιματικές συνθήκες, αλλά και τις ακραίες (καύσωνες, πλημμύρες, καταιγίδες), ενσωματώνοντας μέτρα παθητικής προστασίας, ευελιξίας χρήσεων, εφεδρικών υποδομών

και δυνατότητας σταδιακής αναβάθμισης. Η ανθεκτικότητα συνδέεται έτσι τόσο με την περιβαλλοντική διάσταση (προσαρμογή και μετριασμός της κλιματικής αλλαγής), όσο και με την κοινωνική (προστασία ευάλωτων ομάδων, διατήρηση λειτουργίας κρίσιμων υποδομών) και οικονομική διάσταση (μείωση κινδύνου και κόστους καταστροφών) (Meerow et al., 2016; Jabareen, 2013).

Συνοψίζοντας, η βιωσιμότητα στα κτίρια δεν συνιστά μια μονοδιάστατη τεχνική επιδίωξη, αλλά ένα πολυπαραμετρικό πλαίσιο στο οποίο οι περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και κοινωνικοί στόχοι συνυπάρχουν και αλληλοεπιδρούν. Οι έννοιες της ενεργειακής απόδοσης, της ανάλυσης κύκλου ζωής και της ανθεκτικότητας αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για την κατανόηση και την αποτίμηση της κτιριακής επίδοσης σε αυτό το πλαίσιο. Στο επόμενο υποκεφάλαιο, οι γενικές αυτές αρχές θα μεταφραστούν σε συγκεκριμένες χωρικές και μορφολογικές στρατηγικές, μέσα από την παρουσίαση των αρχών της βιώσιμης αρχιτεκτονικής και του βιοκλιματικού σχεδιασμού.

2.2 Αρχές βιώσιμης αρχιτεκτονικής και βιοκλιματικού σχεδιασμού

Η βιώσιμη αρχιτεκτονική μπορεί να ιδωθεί ως η χωρική και τεχνική «μετάφραση» των γενικών αρχών της βιωσιμότητας σε επίπεδο κτιρίου και υπαίθριου χώρου. Δεν αφορά μόνο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά τη συνολική προσαρμογή του κτιρίου στο τοπικό κλίμα, τη βέλτιστη αξιοποίηση των φυσικών πόρων και τη δημιουργία υγιών, άνετων και κοινωνικά συμπεριληπτικών χώρων. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός, ειδικότερα, ορίζεται ως προσέγγιση που βασίζεται στη συστηματική αξιοποίηση των κλιματικών δεδομένων της περιοχής - ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος, θερμοκρασία, υγρασία- για την επίτευξη συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης με κυρίως παθητικά μέσα (Bioclimatic Design, 2019; DeKay & Brown, 2014).

Στη διεθνή βιβλιογραφία, οι αρχές της βιώσιμης αρχιτεκτονικής συνοψίζονται σε ένα σύνολο στρατηγικών που εκτείνονται από την επιλογή θέσης και τον γενικό σχεδιασμό του κτιρίου, έως τη λεπτομέρεια του κελύφους, την επιλογή υλικών, τη διαχείριση νερού και την ενσωμάτωση πρασίνου (Clark, 2013). Στην ευρωπαϊκή και διεθνή πρακτική, οι ίδιες αυτές αρχές αποτελούν τη βάση για την επίτευξη κτιρίων σχεδόν μηδενικής ή μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nZEB (nearly Zero Energy Building), ZEB (Zero Energy Building)), όπως προωθούνται μέσω της ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD (Energy Performance of Buildings Directive))

και συναφών κατευθυντήριων κειμένων (Buildings Performance Institute Europe (BPIE) /Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA), 2021 European Commission, 2024).

Προσανατολισμός και μορφολογία κτιρίου

Ο προσανατολισμός και η γενική μορφολογία του κτιρίου αποτελούν κρίσιμα σημεία εκκίνησης για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό. Με βάση τις κλιματικές συνθήκες της κάθε περιοχής, ο αρχιτέκτονας καλείται να διαμορφώσει τον όγκο, τη συμπαγότητα, το ύψος και τη διάταξη των κτιριακών μαζών με τρόπο που να εξισορροπεί την ηλιακή πρόσπτωση, την έκθεση στους ανέμους και την πρόσβαση σε φυσικό φωτισμό (DeKay & Brown, 2014). Σε εύκρατα κλίματα, ενδεικτικά, προκρίνεται συχνά η μεγιστοποίηση των επιφανειών με νότιο προσανατολισμό (στο βόρειο ημισφαίριο), ώστε να διευκολύνεται ο χειμερινός ηλιασμός και να ελέγχεται πιο εύκολα ο θερινός, σε συνδυασμό με κατάλληλες ζώνες σκίασης. Ο οδηγός βιοκλιματικού σχεδιασμού του ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου PIME'S, για παράδειγμα, προτείνει τον προσανατολισμό των κύριων χώρων προς τον νότο και την ελαχιστοποίηση των εκτεθειμένων ανατολικών και δυτικών όψεων, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο δύσκολα ελεγχόμενη (PIME'S Guide for Bioclimatic Design, 2014).

Η μορφολογία του κτιρίου -συμπαγής ή αναπτυγμένη κάτοψη, ύπαρξη αίθριων, στοών, ημι-υπαίθριων χώρων- επηρεάζει σημαντικά τόσο τις ενεργειακές ροές όσο και την ποιότητα του μικροκλίματος γύρω από το κτίριο. Συμπαγείς όγκοι με ευνοϊκό προσανατολισμό μειώνουν τις θερμικές απώλειες, ενώ πιο «διάτρητες» μορφές με εσωτερικές αυλές μπορούν να ενισχύσουν τον φυσικό αερισμό και να δημιουργήσουν προστατευμένους μικροκλιματικούς χώρους, ιδίως σε θερμά κλίματα (Bioclimatic Design, 2019, Net Zero Cities, 2022).

Σκίαση και έλεγχος ηλιασμού

Η διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω σκίασης αποτελεί κεντρικό εργαλείο παθητικού δροσισμού. Ο στόχος είναι διπλός: να επιτρέπεται ο χειμερινός ηλιασμός στους χώρους που τον χρειάζονται και να περιορίζεται η θερινή υπερθέρμανση, τόσο στο κέλυφος όσο και στους υπαίθριους χώρους. Οι στρατηγικές σκίασης περιλαμβάνουν σταθερά και κινητά σκίαστρα (προεξοχές, περσίδες, οριζόντιες και κατακόρυφες λωρίδες), στοές και ημι-υπαίθριους χώρους, καθώς και τη χρήση φυτεύσεων, ιδίως

φυλλοβόλων δέντρων, σε κατάλληλες θέσεις (DeKay & Brown, 2014; Smart Cities Marketplace, 2017).

Σε τεχνικό επίπεδο, η σωστή γεωμετρία σκιάστρων σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος και τη γωνία ηλίου μπορεί να μειώσει σημαντικά τα ηλιακά κέρδη το καλοκαίρι χωρίς να στερεί τον χειμερινό ήλιο, ενώ η στρατηγική χρήση φυτεύσεων επιτρέπει δυναμική προσαρμογή, αφού το φύλλωμα μεταβάλλεται εποχικά. Μελέτες για παθητικές στρατηγικές σε κτίρια σχεδόν μηδενικής ενέργειας υπογραμμίζουν ότι η αποτελεσματική σκίαση, σε συνδυασμό με υψηλή θερμομόνωση, μειώνει δραστικά τα ψυκτικά φορτία και βελτιώνει τη θερμική άνεση, περιορίζοντας την ανάγκη για μηχανική ψύξη (Net Zero Cities, 2022).

Φυσικός φωτισμός και οπτική άνεση

Ο φυσικός φωτισμός αποτελεί βασική παράμετρο της βιώσιμης αρχιτεκτονικής, καθώς επηρεάζει τόσο την ενεργειακή κατανάλωση για φωτισμό όσο και την οπτική άνεση και την ευημερία των χρηστών. Στρατηγικές για τη βελτιστοποίηση του φυσικού φωτισμού περιλαμβάνουν την κατάλληλη διαστασιολόγηση και τοποθέτηση ανοιγμάτων, τη χρήση φεγγιτών και ανωφώτων, τη διαμόρφωση εσωτερικών αυλών που επιτρέπουν βαθύτερη διείσδυση φωτός, καθώς και τη χρήση ανακλαστικών ή ημιδιάφανων επιφανειών που διαχέουν το φως (DeKay & Brown, 2014).

Η επιδίωξη επαρκούς φυσικού φωτισμού οφείλει να ισορροπεί με τον έλεγχο της θάμβωσης και των ανεπιθύμητων θερμικών κερδών. Στο πλαίσιο των κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενέργειας, έχει αναδειχθεί η ανάγκη ολοκληρωμένου σχεδιασμού φωτισμού, όπου η γεωμετρία του κελύφους, τα υαλοστάσια, τα σκίαστρα και τα ηλεκτρικά συστήματα φωτισμού αντιμετωπίζονται ως ενιαίο σύστημα (D'Agostino et al., 2021).

Φυσικός αερισμός και παθητικός δροσισμός

Ο φυσικός αερισμός και ο παθητικός δροσισμός αποτελούν βασικές στρατηγικές για τη διατήρηση αποδεκτών θερμικών συνθηκών με περιορισμένη χρήση μηχανικών συστημάτων. Οι τεχνικές φυσικού αερισμού περιλαμβάνουν τον εγκάρσιο αερισμό (cross ventilation) μέσω αντικριστών ανοιγμάτων, τον κάθετο ή «φαινόμενο καμινάδας» (stack effect) όπου η θερμότερη αέρας απομακρύνεται μέσω ανώτερων ανοιγμάτων, καθώς και

τον νυχτερινό αερισμό (night cooling) για την αποβολή της αποθηκευμένης θερμότητας από την κτιριακή μάζα (Net Zero Cities, 2022).

Ο παθητικός δροσισμός μπορεί, επιπλέον, να ενισχυθεί μέσω της χρήσης θερμικής μάζας (π.χ. βαριά δομικά στοιχεία που αποθηκεύουν θερμότητα), της εξατμιστικής ψύξης (υδάτινα στοιχεία, υγρές επιφάνειες) και της στρατηγικής φύτευσης, που μειώνει τις επιφανειακές θερμοκρασίες και βελτιώνει τις μικροκλιματικές συνθήκες γύρω από το κτίριο. Οι στρατηγικές αυτές είναι ιδιαίτερα κρίσιμες σε περιοχές με συχνούς καύσωνες, καθώς συμβάλλουν στην ανθεκτικότητα των κτιρίων και στη μείωση του θερμικού στρες για ευάλωτες ομάδες, όπως τα παιδιά (Bioclimatic Design, 2019).

Υλικά, θερμική μάζα και περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Η επιλογή δομικών υλικών στη βιώσιμη αρχιτεκτονική δεν αφορά μόνο τις μηχανικές τους ιδιότητες, αλλά και το περιβαλλοντικό και υγειονομικό τους αποτύπωμα σε όλο τον κύκλο ζωής. Βασικές αρχές περιλαμβάνουν τη μείωση της «ενσωματωμένης ενέργειας» (embodied energy), την προτίμηση υλικών με χαμηλές εκπομπές κατά την παραγωγή, τη δυνατότητα ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης, καθώς και τη χρήση πιστοποιημένων προϊόντων με μειωμένες εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (Clark, 2013, Sustainable Architecture: Concepts and Principles, 2010).

Παράλληλα, η θερμική μάζα των υλικών παίζει καίριο ρόλο στον παθητικό έλεγχο της θερμοκρασίας. Υλικά με υψηλή θερμική χωρητικότητα, όταν συνδυάζονται με κατάλληλες στρατηγικές σκίασης και αερισμού, μπορούν να εξομαλύνουν τις θερμικές διακυμάνσεις, αποθηκεύοντας θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποδίδοντάς την όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνεται. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κλίματα με σημαντικές ημερήσιες διακυμάνσεις ή σε σχολικά περιβάλλοντα, όπου η σταθερότητα των συνθηκών συμβάλλει στην άνεση και τη συγκέντρωση των μαθητών.

Διαχείριση νερού και υδάτινων πόρων

Η βιώσιμη αρχιτεκτονική ενσωματώνει, επίσης, στρατηγικές διαχείρισης νερού, τόσο σε επίπεδο ζήτησης όσο και σε επίπεδο απορροής. Οι αρχές αυτές περιλαμβάνουν τη μείωση της κατανάλωσης μέσω αποδοτικών υδραυλικών εγκαταστάσεων, τη συλλογή και χρήση όμβριων υδάτων για άρδευση ή άλλες μη πόσιμες χρήσεις, καθώς και τη διαχείριση των επιφανειακών απορροών με μέσα που προάγουν τη διήθηση και την καθυστέρηση της

απορροής, όπως διαπερατά δάπεδα και δεξαμενές ανάσχεσης (National Institute of Building Sciences, 2011).

Σε αστικά περιβάλλοντα, οι στρατηγικές αυτές συνδέονται στενά με την αντιμετώπιση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας και τη μείωση του κινδύνου πλημμυρών. Η ενσωμάτωση στοιχείων νερού και υδατοπερατών επιφανειών γύρω από τα κτίρια συμβάλλει στη βελτίωση του μικροκλίματος, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για υπαίθριους χώρους όπως οι σχολικές αυλές, όπου η παρουσία σκληρών αδιαπέραστων επιφανειών επιτείνει την υπερθέρμανση.

Ενσωμάτωση πρασίνου: φυτεύσεις, πράσινες στέγες και κάθετοι κήποι

Η ενσωμάτωση πρασίνου σε κτίρια και υπαίθριους χώρους αποτελεί βασικό εργαλείο τόσο για τη βελτίωση της ενεργειακής και μικροκλιματικής επίδοσης όσο και για την ενίσχυση της βιοποικιλότητας και της ψυχοκοινωνικής ευημερίας των χρηστών. Η φύτευση του εδάφους, οι δενδροστοιχίες, οι πράσινες στέγες και οι κάθετοι κήποι μπορούν να μειώσουν τις επιφανειακές θερμοκρασίες, να βελτιώσουν τη θερμική άνεση, να συκρατήσουν όμβρια ύδατα και να φιλτράρουν ρύπους (Jaffal, Ouldboukhite, & Belarbi, 2012; Jamei et al., 2023; De Cristo et al., 2025).

Συγκεκριμένα, συστηματικές ανασκοπήσεις δείχνουν ότι οι πράσινες στέγες μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις θερμικές ροές μέσω του δώματος (έως και 80% σε ορισμένες περιπτώσεις), να βελτιώσουν την ενεργειακή επίδοση και να συμβάλουν στον περιορισμό των θερμοκρασιακών αιχμών σε αστικά περιβάλλοντα (Jaffal et al., 2012; Raji, Tenpierik, & van den Dobbelsteen, 2015). Στο πλαίσιο σχολικών κτιρίων και αυλών, η φύτευση συνδέεται επιπλέον με τη δημιουργία ποιοτικών χώρων παιχνιδιού και μάθησης, με δυνατότητες υπαίθριας διδασκαλίας και περιβαλλοντικής εκπαίδευσης, γεγονός που προσδίδει στις στρατηγικές αυτές σαφή παιδαγωγική διάσταση.

2.3 Βιώσιμα σχολικά κτίρια

Τα σχολικά κτίρια αποτελούν μια ιδιαίτερη τυπολογία του δομημένου περιβάλλοντος, καθώς λειτουργούν ως βασικές κοινωνικές και παιδαγωγικές υποδομές όπου διαμορφώνονται καθημερινά οι εμπειρίες, οι στάσεις και οι προσδοκίες των μαθητών για τη μάθηση, το περιβάλλον και τη συλλογική ζωή. Η διεθνής συζήτηση γύρω από τα «πράσινα» ή «υψηλής επίδοσης» σχολεία (green/high-performance schools) έχει αναδείξει

ότι η ποιότητα του σχολικού κτιρίου μπορεί να επηρεάζει όχι μόνο την κατανάλωση πόρων και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αλλά και την υγεία, την ευημερία και την εκπαιδευτική επίδοση των μαθητών και των εκπαιδευτικών (National Research Council, 2006).

2.3.1 Το κίνημα των «πράσινων σχολείων» και οι διεθνείς κατευθύνσεις

Από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, αναπτύχθηκαν σε ΗΠΑ, Καναδά και Ευρώπη εξειδικευμένα πλαίσια και οδηγοί για τον σχεδιασμό «πράσινων σχολείων», τα οποία προσαρμόζουν τις γενικές αρχές βιώσιμου σχεδιασμού στις ιδιαιτερότητες της σχολικής τυπολογίας. Ενδεικτικά, τα συστήματα LEED for Schools και Collaborative for High Performance Schools (CHPS) θεσπίζουν ειδικά κριτήρια για σχολικά κτίρια σε τομείς όπως η ενεργειακή απόδοση, η ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, η χρήση υλικών, η διαχείριση νερού, ο σχεδιασμός του οικοπέδου και η προσβασιμότητα, με έμφαση τόσο στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος όσο και στη δημιουργία υγιών, ασφαλών και παιδαγωγικά υποστηρικτικών χώρων (U.S. Green Building Council (USGBC), 2012; Ramli, 2018; USGBC-CHPS, 2025).

Αντίστοιχοι οδηγοί, όπως ο *Green Schools Resource Guide* στον Καναδά ή τα τοπικά *Green Schools Guides* σε πολιτείες και πόλεις της Βόρειας Αμερικής, προσφέρουν πρακτικά εργαλεία και κριτήρια για τον σχεδιασμό σχολείων με μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και βελτιωμένες συνθήκες υγείας και μάθησης. Συνολικά, τα πλαίσια αυτά συγκλίνουν στην ιδέα ότι το «βιώσιμο σχολείο» οφείλει να αντιμετωπίζεται ως ενιαίο σύστημα, στο οποίο κέλυφος, τεχνικά συστήματα, εσωτερικό περιβάλλον και υπαίθριοι χώροι σχεδιάζονται με κοινό στόχο την ενεργειακή επάρκεια, την υγιεινή και την παιδαγωγική ποιότητα (Ramli, 2018; Akyel, 2025).

Η έκθεση *Green Schools: Attributes for Health and Learning* της National Research Council (2006) συνοψίζει τα ευρήματα ενός μεγάλου σώματος ερευνών, καταλήγοντας ότι υπάρχει επαρκής επιστημονική τεκμηρίωση για τη θετική επίδραση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του σχολικού περιβάλλοντος -όπως ο καλός αερισμός, η επαρκής θερμική και οπτική άνεση και η χαμηλή έκθεση σε ρύπους- στην υγεία, στην σχολική φοίτηση και, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, στην επίδοση των μαθητών. Η έκθεση αυτή αποτέλεσε σημείο αναφοράς για τη σύνδεση των «πράσινων» σχολείων με τη δημόσια υγεία και την εκπαιδευτική πολιτική.

Πιο πρόσφατα, οργανισμοί όπως το Center for Green Schools του USGBC υποστηρίζουν συστηματικά σχολικές περιφέρειες στη μετάβαση σε πιο υγιείς και βιώσιμες σχολικές υποδομές, δίνοντας έμφαση τόσο στις τεχνικές προδιαγραφές όσο και στη συμμετοχή εκπαιδευτικών και μαθητών σε διαδικασίες σχεδιασμού και λειτουργίας (USGBC, 2025). Παράλληλα, εθνικές αρχές σε διάφορες χώρες έχουν εκδώσει εξειδικευμένες οδηγίες για τον σχεδιασμό σχολικών κτιρίων με έμφαση στο εσωτερικό περιβάλλον, όπως οι οδηγίες Building Bulletin 101 (BB101) στο Ηνωμένο Βασίλειο ή αντίστοιχα εγχειρίδια για τον αερισμό, τη θερμική άνεση και την ποιότητα του αέρα σε σχολικές αίθουσες (Department for Education (DfE), 2016; Ministry of Education NZ, 2022).

2.3.2 Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος και μάθηση

Κεντρικό στοιχείο των βιώσιμων σχολικών κτιρίων αποτελεί η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος (Indoor Environmental Quality- IEQ), η οποία συνήθως ορίζεται ως συνάρτηση τεσσάρων βασικών παραμέτρων: ποιότητα εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality- IAQ), θερμική άνεση, οπτική άνεση (φωτισμός) και ακουστική. Πρόσφατες ανασκοπήσεις της βιβλιογραφίας έχουν δείξει ότι οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα την υγεία, την άνεση και την γνωστική λειτουργία των μαθητών (Toyinbo, 2023, Brink et al., 2022; Khoshnaw, 2025).

Σχετικά με την ποιότητα του αέρα, μελέτες έχουν δείξει ότι υψηλές συγκεντρώσεις CO₂, σωματιδίων και ρύπων εσωτερικού ή εξωτερικού προέλευσης σχετίζονται με αυξημένη κόπωση, πονοκεφάλους, αναπνευστικά συμπτώματα και μειωμένη συγκέντρωση στους μαθητές (Toyinbo, 2023; Temprano et al., 2020). Σε πολλά σχολικά κτίρια, ιδίως σε αστικές περιοχές με έντονη ατμοσφαιρική ρύπανση, η επίτευξη επαρκούς αερισμού χωρίς ταυτόχρονη εισαγωγή ρύπων αποτελεί σημαντική πρόκληση, γεγονός που αντικατοπτρίζεται και στις εξειδικευμένες κατευθύνσεις σχεδιασμού για το άνοιγμα ή/και τη μηχανική υποβοήθηση των συστημάτων αερισμού (DfE, 2016; Ministry of Education NZ, 2022).

Η θερμική άνεση σε σχολικές αίθουσες έχει επίσης αναγνωριστεί ως κρίσιμος παράγοντας για την ευεξία και την απόδοση των μαθητών. Πρόσφατες μελέτες σε δευτεροβάθμια σχολεία δείχνουν ότι η βελτιστοποίηση των θερμικών συνθηκών μέσω βιοκλιματικών στρατηγικών (κατάλληλος προσανατολισμός, σκίαση, θερμική μάζα, φυσικός αερισμός) μπορεί να μειώσει σημαντικά την υπερθέρμανση, να περιορίσει το θερμικό στρες και να

βελτιώσει τους δείκτες άνεσης, με θετικές επιπτώσεις στη συγκέντρωση και στην ψυχοσωματική κόπωση (Gutierrez, 2024; Safiuddin & Abdin, 2025; Arya, 2025). Ανασκοπήσεις της βιβλιογραφίας επιβεβαιώνουν ότι τόσο η υπερθέρμανση όσο και η υπερβολική ψύξη σχετίζονται με απώλεια προσοχής και μειωμένη επίδοση, ιδίως σε μαθηματικά και γλωσσικά μαθήματα (Lakhdari et al., 2021; Temprano et al., 2020).

Η οπτική άνεση και ο επαρκής φυσικός φωτισμός έχουν συνδεθεί με καλύτερη συγκέντρωση, μικρότερη κόπωση των ματιών και πιθανές βελτιώσεις στην επίδοση, αν και τα αποτελέσματα διαφέρουν ανάλογα με τη μεθοδολογία των μελετών (Lakhdari et al., 2021). Η πρόκληση στον σχεδιασμό σχολικών αιθουσών είναι η επίτευξη ισορροπίας ανάμεσα στην επάρκεια φυσικού φωτισμού, τον έλεγχο της θάμβωσης και την αποφυγή υπερβολικών θερμικών κερδών, κάτι που απαιτεί συνδυασμένη θεώρηση γεωμετρίας, ανοιγμάτων, σκίασης και τεχνητού φωτισμού.

Τέλος, η ακουστική ποιότητα των σχολικών χώρων επηρεάζει άμεσα τη δυνατότητα ακρόασης του εκπαιδευτικού και των μαθητών, καθώς και τη γνωστική επιβάρυνση που συνεπάγεται η προσπάθεια κατανόησης σε συνθήκες υψηλού θορύβου. Αν και στην παρούσα εργασία η έμφαση δίνεται κυρίως στις θερμικές και μικροκλιματικές πτυχές, οι διεθνείς οδηγίες για βιώσιμα σχολικά κτίρια αντιμετωπίζουν την ακουστική ως βασικό κριτήριο, συνδέοντάς την τόσο με την επίδοση όσο και με την ψυχοκοινωνική ευημερία (Green Schools Guide, 2019; Healthy High-Performance Schools Design Guide, 2011).

Συνολικά, οι σύγχρονες ανασκοπήσεις της βιβλιογραφίας καταλήγουν ότι η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος σε σχολικά κτίρια ασκεί μετρήσιμη επιρροή στην υγεία, στην άνεση και, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, στην ακαδημαϊκή επίδοση των μαθητών, αν και τα μεγέθη των επιδράσεων και οι μηχανισμοί δεν είναι πάντα απλοί και γραμμικοί (Brink et al., 2022; Temprano et al., 2020; Khoshnaw, 2025).

2.3.3 Βιώσιμα σχολικά κτίρια ως εκπαιδευτικοί και κοινωνικοί πόροι

Πέραν των τεχνικών χαρακτηριστικών, τα βιώσιμα σχολικά κτίρια αντιμετωπίζονται ολοένα και περισσότερο ως εκπαιδευτικοί και κοινωνικοί πόροι. Η βιβλιογραφία για τα «πράσινα σχολεία» επισημαίνει ότι ο σχεδιασμός και η λειτουργία τους μπορούν να υποστηρίξουν την περιβαλλοντική εκπαίδευση, να ενισχύσουν την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και να καλλιεργήσουν στάσεις υπευθυνότητας και φροντίδας απέναντι στον χώρο και στο περιβάλλον (Akyel, 2025). Η ίδια η κτιριακή υποδομή, μέσω ορατών

στοιχείων, όπως συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), πράσινες στέγες, χώρους συλλογής νερού ή μετρητές κατανάλωσης, μπορεί να λειτουργεί ως «ζωντανό εργαστήριο» μάθησης για τη βιωσιμότητα.

Επιπλέον, μελέτες που συνδέουν τη «πρασίνιση» των σχολικών χώρων με γνωστικές και ψυχοκοινωνικές εκβάσεις δείχνουν ότι η παρουσία φυσικών στοιχείων και ποιοτικών υπαίθριων χώρων στην άμεση σχολική γειτονιά σχετίζεται με βελτιωμένη συγκέντρωση, μείωση του στρες και ορισμένες φορές με καλύτερες επιδόσεις σε τυπικές δοκιμασίες (Browning et al., 2019; Van den Bogerd et al., 2023). Τα ευρήματα αυτά, αν και αφορούν σε μεγάλο βαθμό τους υπαίθριους χώρους και τις σχολικές αυλές, υπογραμμίζουν την ανάγκη να αντιμετωπίζεται το σχολικό κτίριο όχι ως απομονωμένη δομή, αλλά ως μέρος ενός ευρύτερου εκπαιδευτικού και αστικού οικοσυστήματος.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η έννοια του «βιώσιμου σχολικού κτιρίου» συνδέεται όλο και περισσότερο με ζητήματα ισότητας και δικαιοσύνης. Σε πολλές χώρες, σχολεία που εξυπηρετούν κοινωνικά ή οικονομικά ευάλωτες ομάδες στεγάζονται σε παλαιότερα, λιγότερο αποδοτικά και συχνά υποβαθμισμένα κτίρια, γεγονός που μπορεί να εντείνει τις εκπαιδευτικές ανισότητες. Η στοχευμένη αναβάθμιση των σχολικών υποδομών με κριτήρια βιωσιμότητας και υγείας αντιμετωπίζεται, συνεπώς, όχι μόνο ως περιβαλλοντική και ενεργειακή πολιτική, αλλά και ως παρέμβαση κοινωνικής δικαιοσύνης (National Research Council, 2006; Khoshnaw, 2025).

2.3.4 Βιώσιμη και βιοκλιματική αναβάθμιση υφιστάμενων και ιστορικών σχολικών κτιρίων

Η συζήτηση για τα βιώσιμα σχολικά κτίρια δεν αφορά μόνο τον σχεδιασμό νέων εκπαιδευτικών εγκαταστάσεων. Μεγάλο μέρος της εκπαιδευτικής δραστηριότητας στεγάζεται σε υφιστάμενα κτίρια, τα οποία έχουν κατασκευαστεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και συχνά δεν ανταποκρίνονται πλήρως στις σύγχρονες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης, θερμικής άνεσης, ποιότητας αέρα, προσβασιμότητας και λειτουργικής ευελιξίας. Η αναβάθμιση αυτών των κτιρίων μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής τους, να περιορίσει την κατανάλωση νέων πόρων και να βελτιώσει τις συνθήκες χρήσης τους, χωρίς να απαιτεί την κατεδάφιση και αντικατάστασή τους. Για τον λόγο αυτό, η βιώσιμη ανακαίνιση των σχολικών υποδομών αντιμετωπίζεται ως σύνθετη διαδικασία, η οποία πρέπει να συνδυάζει την περιβαλλοντική απόδοση με την άνεση των

χρηστών, τις εκπαιδευτικές ανάγκες, το κόστος και τις πραγματικές δυνατότητες του υφιστάμενου κτιρίου (Le et al., 2021).

Η αναβάθμιση ενός υφιστάμενου σχολείου διαφοροποιείται ουσιαστικά από τον σχεδιασμό ενός νέου κτιρίου. Στον νέο σχεδιασμό οι αποφάσεις για τον προσανατολισμό, τη μορφή, τη διάταξη των χώρων, το κέλυφος και τα τεχνικά συστήματα μπορούν να ενσωματωθούν εξ αρχής σε μια ενιαία στρατηγική. Αντίθετα, σε ένα υφιστάμενο κτίριο ο μελετητής καλείται να εργαστεί μέσα σε δεδομένους χωρικούς, μορφολογικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς. Η γεωμετρία, τα υλικά, τα ανοίγματα, οι διαδρομές αερισμού και οι προηγούμενες επεμβάσεις δεν μπορούν να μεταβληθούν ελεύθερα, αλλά πρέπει πρώτα να καταγραφούν, να ερμηνευθούν και να αξιολογηθούν.

Η ανάγκη αυτή γίνεται εντονότερη στα ιστορικά σχολικά κτίρια. Τα κτίρια αυτά δεν διαθέτουν μόνο λειτουργική αξία ως εκπαιδευτικές μονάδες, αλλά συχνά ενσωματώνουν ιστορικές, αρχιτεκτονικές, κατασκευαστικές και κοινωνικές αξίες. Ακόμη και όταν δεν έχουν χαρακτηριστεί θεσμικά ως διατηρητέα ή μνημεία, μπορεί να αποτελούν αναγνωρίσιμα στοιχεία της τοπικής ιστορίας και της συλλογικής μνήμης. Η μελέτη των Pachta και Giourou (2022) για ένα ιστορικό και ένα σύγχρονο σχολικό κτίριο στη Νάουσα δείχνει ότι η αξιολόγηση τέτοιων κτιρίων δεν πρέπει να περιορίζεται στη λειτουργική ενεργειακή κατανάλωση. Η διάρκεια ζωής, τα υλικά κατασκευής και οι ενσωματωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις επηρεάζουν επίσης τη συνολική περιβαλλοντική τους επίδοση. Επομένως, η διατήρηση και η προσαρμογή ενός υφιστάμενου σχολείου μπορεί να αποτελεί βιώσιμη επιλογή, υπό την προϋπόθεση ότι προηγείται ολοκληρωμένη αξιολόγηση του κτιρίου και των αναγκαίων παρεμβάσεων.

Βασική προϋπόθεση οποιασδήποτε αναβάθμισης είναι η επαρκής γνώση της υφιστάμενης κατάστασης. Η διαδικασία πρέπει να ξεκινά με τη συγκέντρωση των διαθέσιμων σχεδίων και ιστορικών στοιχείων, την αρχιτεκτονική και κατασκευαστική αποτύπωση, την αυτοψία και την καταγραφή των μεταγενέστερων επεμβάσεων. Παράλληλα, είναι αναγκαίο να εξετάζονται η πραγματική λειτουργία των ανοιγμάτων και των συστημάτων σκίασης, η κατάσταση των κουφωμάτων, οι διαδρομές φυσικού αερισμού, η λειτουργία των εγκαταστάσεων θέρμανσης και ψύξης και τα πρότυπα χρήσης των αιθουσών. Όπου είναι δυνατόν, η καταγραφή πρέπει να συμπληρώνεται με μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, διοξειδίου του άνθρακα, φωτισμού και ενεργειακής κατανάλωσης. Οι πληροφορίες αυτές επιτρέπουν να διαχωριστούν τα πραγματικά προβλήματα από τις

υποθέσεις και να αποφευχθεί η εφαρμογή γενικών λύσεων που μπορεί να μην ανταποκρίνονται στις συνθήκες του συγκεκριμένου κτιρίου (Le et al., 2021; Webb, 2017).

Η ανάγκη ειδικής διάγνωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική στα ιστορικά και παραδοσιακά κελύφη. Τα κτίρια αυτά μπορεί να στηρίζονται σε διαφορετική περιβαλλοντική και κατασκευαστική λογική από τα νεότερα κτίρια, αξιοποιώντας τη θερμική μάζα, τον φυσικό αερισμό, τα μεγάλα ανοίγματα, τους φεγγίτες, τα παντζούρια ή άλλες παθητικές στρατηγικές. Παράλληλα, τα παραδοσιακά υλικά μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ως προς τη θερμότητα, την υγρασία και τη διαπνοή. Η άκριτη μεταφορά λύσεων που έχουν σχεδιαστεί για σύγχρονες κατασκευές μπορεί να αλλοιώσει αυτή τη λειτουργία ή να δημιουργήσει νέα προβλήματα, όπως συγκέντρωση υγρασίας, ανεπαρκή αερισμό ή αλλοίωση χαρακτηριστικών στοιχείων του κελύφους. Η ενεργειακή αναβάθμιση ιστορικών κτιρίων αποτελεί, επομένως, διαδικασία εξισορρόπησης ανάμεσα στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, στη διατήρηση του κτιριακού ιστού, στην ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και στη συνέχιση της χρήσης του κτιρίου (Webb, 2017).

Μια κατάλληλη στρατηγική αναβάθμισης μπορεί να οργανωθεί σταδιακά, αρχίζοντας από τις λιγότερο παρεμβατικές ενέργειες. Σε ένα πρώτο επίπεδο περιλαμβάνονται η συντήρηση, η επισκευή και η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των υφιστάμενων στοιχείων. Η αποκατάσταση της λειτουργίας των παντζουριών, ο έλεγχος των κουφωμάτων, η συντήρηση των κλιματιστικών μονάδων, η διερεύνηση των αρχικών ανοιγμάτων αερισμού και η ορθότερη χρήση των μέσων σκίασης μπορούν να προηγηθούν της πλήρους αντικατάστασης ή της προσθήκης νέων συστημάτων. Οι ενέργειες αυτές είναι συνήθως λιγότερο επεμβατικές, παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες για την πραγματική συμπεριφορά του κτιρίου και μπορούν να αποτρέψουν πρόωρες αποφάσεις που βασίζονται σε ελλιπή δεδομένα.

Σε δεύτερο επίπεδο μπορούν να εξεταστούν ήπιες, στοχευμένες και κατά το δυνατόν αναστρέψιμες παρεμβάσεις. Σε αυτές μπορεί να περιλαμβάνονται η προσθήκη κινητών ή ελαφρών στοιχείων σκίασης, η τοπική βελτίωση της αεροστεγανότητας, η επισκευή ή επιλεκτική αναβάθμιση των υαλοπινάκων, η ενίσχυση του ελεγχόμενου φυσικού αερισμού και η εφαρμογή περιορισμένων φυτεύσεων στον άμεσα συνδεδεμένο υπαίθριο χώρο. Η δυνατότητα απομάκρυνσης ή μεταβολής των νέων στοιχείων χωρίς μόνιμη βλάβη

του κελύφους αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα όταν δεν είναι ακόμη διαθέσιμα όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για μια οριστική λύση.

Οι περισσότερες εκτεταμένες παρεμβάσεις, όπως η συνολική αντικατάσταση κουφωμάτων, η προσθήκη μόνιμων εξωτερικών σκιάστρων, η θερμική ενίσχυση του κελύφους, η αναδιοργάνωση των εγκαταστάσεων αερισμού και ψύξης ή η εκτεταμένη αναδιαμόρφωση του υπαίθριου χώρου, πρέπει να εξετάζονται σε επόμενο στάδιο. Η εφαρμογή τους προϋποθέτει τεχνική τεκμηρίωση, μετρήσεις, ενεργειακούς και υδροθερμικούς υπολογισμούς, έλεγχο της κατασκευαστικής σύνδεσης και, όπου απαιτείται, στατική ή ηλεκτρομηχανολογική μελέτη. Η επιλογή μιας περισσότερο σύνθετης λύσης δεν πρέπει να βασίζεται μόνο στο θεωρητικό ενεργειακό της όφελος, αλλά και στην τεχνική της εφαρμοσιμότητα, στις ανάγκες συντήρησης, στην ανθεκτικότητα των υλικών και στον βαθμό αλλοίωσης του κτιρίου.

Οι επιμέρους παρεμβάσεις πρέπει επίσης να αξιολογούνται ως τμήματα ενός ενιαίου περιβαλλοντικού συστήματος. Η ενίσχυση της σκίασης μπορεί να περιορίσει τη θερινή ηλιακή επιβάρυνση, αλλά είναι πιθανό να μειώσει τον φυσικό φωτισμό. Η βελτίωση της αεροστεγανότητας μπορεί να μειώσει τις θερμικές απώλειες, αλλά, εάν δεν συνοδεύεται από επαρκή αερισμό, μπορεί να επιδεινώσει την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Αντίστοιχα, η αποκατάσταση του φυσικού αερισμού δεν εξασφαλίζει αυτομάτως θερμική άνεση, ιδίως όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι υψηλές. Στα σχολικά κτίρια, στα οποία η πυκνότητα των χρηστών είναι αυξημένη και οι κύριοι χρήστες είναι παιδιά, η εξοικονόμηση ενέργειας δεν πρέπει να επιτυγχάνεται εις βάρος της ποιότητας του αέρα, της θερμικής άνεσης ή της οπτικής άνεσης (Department for Education, 2018; Toyinbo, 2023).

Εξίσου σημαντική είναι η αρχιτεκτονική συμβατότητα των παρεμβάσεων. Τα νέα στοιχεία πρέπει να αξιολογούνται ως προς την κλίμακα, τη μορφή, τα υλικά, το χρώμα, τη θέση και τον τρόπο σύνδεσής τους με το υφιστάμενο κτίριο. Σε μια όψη που χαρακτηρίζεται από επανάληψη ανοιγμάτων και σαφή μορφολογικό ρυθμό, ένα νέο σύστημα σκίασης ή η μετακίνηση τεχνικού εξοπλισμού μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά τη συνολική εικόνα. Η συμβατότητα δεν σημαίνει ότι κάθε νέο στοιχείο πρέπει να μιμείται την αρχική κατασκευή, αλλά ότι πρέπει να εντάσσεται χωρίς να υποβαθμίζει την αναγνωρισιμότητα και τα ουσιαστικά χαρακτηριστικά της. Αντίστοιχα, η επισκευή και η διατήρηση

υφιστάμενων στοιχείων πρέπει να εξετάζονται πριν από την αντικατάστασή τους, εφόσον η κατάστασή τους και οι απαιτήσεις ασφάλειας το επιτρέπουν.

Η βιώσιμη αναβάθμιση ενός σχολείου πρέπει, τέλος, να λαμβάνει υπόψη τη συνεχιζόμενη λειτουργία του. Οι παρεμβάσεις πρέπει να μπορούν να υλοποιηθούν με ελεγχόμενη όχληση, να μην δημιουργούν κινδύνους για τους μαθητές και το προσωπικό και να συνοδεύονται από ρεαλιστικές απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης. Μια τεχνικά σύνθετη λύση μπορεί να παρουσιάζει υψηλή θεωρητική απόδοση, αλλά να αποδεικνύεται ακατάλληλη όταν απαιτεί εξειδικευμένη και συχνή συντήρηση, πολύπλοκο χειρισμό ή εκτεταμένη διακοπή της σχολικής δραστηριότητας. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των λύσεων πρέπει να παραμένει πολυκριτηριακή και να συνδυάζει την περιβαλλοντική απόδοση, την υγεία και την άνεση των χρηστών, την τεχνική δυνατότητα εφαρμογής, το κόστος κύκλου ζωής και τις ιδιαίτερες ανάγκες της εκπαιδευτικής μονάδας (Saraiva et al., 2019).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι παραπάνω αρχές θεμελιώνουν τη διάκριση ανάμεσα σε ένα σενάριο ελάχιστης παρέμβασης και σε ένα σενάριο ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης. Παράλληλα, υποστηρίζουν τη χρήση της τεχνικής εφαρμοσιμότητας και της αρχιτεκτονικής συμβατότητας ως αυτοτελών κριτηρίων αξιολόγησης. Μια πρόταση δεν θεωρείται κατάλληλη μόνο επειδή ακολουθεί γενικές αρχές βιοκλιματικού σχεδιασμού. Πρέπει επίσης να ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση του κτιρίου, να βασίζεται σε επαρκή δεδομένα, να μπορεί να ενσωματωθεί στην υφιστάμενη κατασκευή και να αναγνωρίζει τις πρόσθετες μελέτες που απαιτούνται πριν από την εφαρμογή της.

2.4 Σχολικές αυλές και υπαίθριοι παιδαγωγικοί χώροι

Οι σχολικές αυλές και οι υπαίθριοι χώροι των εκπαιδευτικών μονάδων αποτελούν κρίσιμο, αλλά συχνά υποτιμημένο, τμήμα του σχολικού περιβάλλοντος. Δεν είναι απλώς «κενά» ανάμεσα σε κτίρια ή χώροι διαλείμματος, αλλά τόποι όπου συμπυκνώνονται μικροκλιματικές διεργασίες, κοινωνικές σχέσεις και παιδαγωγικές πρακτικές. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αρχίσει να αναδεικνύει ότι οι «πρασινισμένες» ή αναβαθμισμένες σχολικές αυλές μπορούν να λειτουργήσουν ως καταλύτες για την υγεία, τη μάθηση, την κοινωνική ένταξη και την κλιματική ανθεκτικότητα, ιδίως σε αστικά περιβάλλοντα

υψηλής θερμικής και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (Vanos, 2015; Antoniadis et al., 2020; Lanza et al., 2022).

2.4.1 Η σχολική αυλή ως μικροκλιματικός χώρος

Σε πυκνοδομημένες αστικές περιοχές, η σχολική αυλή συχνά αποτελεί έναν από τους ελάχιστους καθημερινά προσβάσιμους υπαίθριους χώρους για τα παιδιά. Ωστόσο, η κυρίαρχη εικόνα πολλών σχολικών αυλών χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες (ασφαλτοτάπητες, τσιμέντο), περιορισμένη φύτευση και ανεπαρκή σκίαση, με αποτέλεσμα υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες και αυξημένο θερμικό στρες κατά τη θερινή περίοδο (Antoniadis et al., 2020). Μελέτες για το θερμικό περιβάλλον αστικών σχολικών αυλών καταδεικνύουν ότι, υπό συνθήκες έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, οι θερμοκρασίες επιφανειών και ο μέσος ακτινοβολικός δείκτης μπορούν να υπερβούν κατά πολύ τις τιμές του αέρα, οδηγώντας σε συνθήκες έντονης θερμικής δυσφορίας για τα παιδιά, ιδίως κατά τις ώρες του διαλείμματος.

Η βιβλιογραφία για την ευαλωτότητα των παιδιών σε υπαίθρια μικροκλίματα υπογραμμίζει ότι τα παιδιά δεν είναι «μικροί ενήλικες»: εμφανίζουν διαφορετική θερμορρυθμιστική φυσιολογία, συχνά μεγαλύτερη σωματική δραστηριότητα και περιορισμένη ικανότητα αναγνώρισης και διαχείρισης κινδύνων θερμικού στρες (Vanos, 2015). Πρόσφατες εργασίες προτείνουν εξειδικευμένα όρια και δείκτες εξωτερικής θερμικής άνεσης για παιδιά, λαμβάνοντας υπόψη θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου και ακτινοβολία, και αναδεικνύουν τρεις βασικές κατηγορίες παρεμβάσεων: ενίσχυση της σκίασης, κυρίως μέσω φυτεύσεων και ελαφρών στεγάστρων, χρήση υλικών με χαμηλή θερμοχωρητικότητα και υψηλή ανακλαστικότητα, και βελτίωση του αερισμού των υπαίθριων χώρων (Luyao et al., 2025; Lanza et al., 2022).

Στο πλαίσιο αυτό, ο «πρασίνισμα» των σχολικών αυλών, μέσω αύξησης της δενδροφύτευσης, εισαγωγής παρτεριών, βιοκλιματικών νησίδων και υδατικών στοιχείων, δεν αποτελεί μόνο αισθητική ή οικολογική επιλογή, αλλά καίρια μικροκλιματική στρατηγική. Συστηματικές ανασκοπήσεις δείχνουν ότι η αύξηση της φυτοκάλυψης και της σκίασης στις αυλές μπορεί να μειώσει τις επιφανειακές θερμοκρασίες, να περιορίσει την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και να βελτιώσει τους δείκτες θερμικής άνεσης των παιδιών, συμβάλλοντας παράλληλα στην αντιμετώπιση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (Antoniadis et al., 2020; Van Dijk-Wesselijs et al., 2018).

2.4.2 Η σχολική αυλή ως κοινωνικός και κοινοτικός χώρος

Η σχολική αυλή λειτουργεί, ταυτόχρονα, ως κατεξοχήν κοινωνικός χώρος, όπου τα παιδιά αλληλοεπιδρούν, αναπτύσσουν φιλίες, διαπραγματεύονται κανόνες, συγκρούονται και συμφιλιώνονται. Η έρευνα για τις «πρασινισμένες» σχολικές αυλές δείχνει ότι οι πιο διαφοροποιημένες, φυσικά πλούσιες και πολυλειτουργικές αυλές ευνοούν μεγαλύτερη ποικιλία παιχνιδιού, πιο ισόρροπη συμμετοχή κοριτσιών και αγοριών και περισσότερες ευκαιρίες για συνεργατικές μορφές δραστηριότητας, σε σύγκριση με τις τυπικές ασφάλτινες αυλές που κυριαρχούνται από ένα ή δύο δημοφιλή αθλήματα (π.χ. ποδόσφαιρο) (van Dijk-Wesselius et al., 2018; Bates et al., 2018).

Διεθνή προγράμματα και δίκτυα, όπως το Children & Nature Network και το κίνημα των Green Schoolyards, έχουν αναδείξει ότι οι πράσινες σχολικές αυλές μπορούν να προσφέρουν οφέλη σε πέντε βασικούς άξονες: παιχνίδι, υγεία και ευημερία, κλιματική ανθεκτικότητα και βιοποικιλότητα, κοινοτική συμμετοχή και εκπαίδευση (Children & Nature Network, 2023; Green Schoolyards America, 2020). Η δυνατότητα κοινής χρήσης των αυλών ως γειτονικών χώρων αναψυχής εκτός σχολικού ωραρίου ενισχύει τον ρόλο τους ως κοινοτικών πόρων, ιδίως σε υποβαθμισμένες περιοχές με περιορισμένους δημόσιους χώρους.

Σε επίπεδο κοινωνικοσυναισθηματικής ανάπτυξης, μελέτες που διερευνούν τη χρήση φυσικών υπαίθριων χώρων από τα παιδιά καταδεικνύουν ότι η τακτική επαφή με το φυσικό περιβάλλον συνδέεται με βελτιωμένες δεξιότητες κοινωνικής αλληλεπίδρασης, αυξημένη αυτοπεποίθηση, καλύτερη ικανότητα επίλυσης προβλημάτων, μειωμένα επίπεδα στρες και ευνοϊκές επιδράσεις στην προσοχή (Green Schoolyards, 2020; Green Schoolyards, 2023). Στο πλαίσιο αυτό, η σχολική αυλή δεν αποτελεί απλώς «χώρο εκτόνωσης», αλλά πεδίο κοινωνικής μάθησης και συγκρότησης ταυτοτήτων, στο οποίο η ποιότητα του σχεδιασμού επηρεάζει έμμεσα τα μοτίβα συμπεριφοράς και σχέσεων μεταξύ των μαθητών.

2.4.3 Υπαίθριοι παιδαγωγικοί χώροι και μάθηση έξω από την τάξη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για την υπαίθρια μάθηση (*outdoor learning*) και για τη διαμόρφωση τμημάτων της σχολικής αυλής ως οργανωμένων ή ημι-οργανωμένων παιδαγωγικών χώρων. Η εξέλιξη αυτή σηματοδοτεί τη μετάβαση από την αντιμετώπιση της αυλής αποκλειστικά ως χώρου διαλείμματος προς

ένα μοντέλο στο οποίο ο εξωτερικός χώρος εντάσσεται ενεργά στο πρόγραμμα σπουδών και αξιοποιείται για παρατήρηση, πειραματισμό, συνεργατική εργασία και βιωματική μάθηση (Becker et al., 2017; Mann et al., 2022). Οι συστηματικές μορφές υπαίθριας εκπαίδευσης μπορούν, επομένως, να λειτουργήσουν συμπληρωματικά προς τη διδασκαλία που πραγματοποιείται μέσα στην τάξη.

Οι σχετικές ανασκοπήσεις καταγράφουν θετικές τάσεις ως προς την ενεργό συμμετοχή των μαθητών, την ανάπτυξη κοινωνικών και συνεργατικών δεξιοτήτων, την αυτοαντίληψη και ορισμένες διαστάσεις της ακαδημαϊκής μάθησης. Παράλληλα, η επαφή με φυσικά στοιχεία μπορεί να υποστηρίξει την προσοχή και να δημιουργήσει συνθήκες περισσότερο ευνοϊκές για τη μαθησιακή διαδικασία (Kuo et al., 2019; Mann et al., 2022). Τα ευρήματα αυτά, ωστόσο, δεν είναι ομοιόμορφα σε όλες τις μελέτες, καθώς οι επιδράσεις διαφοροποιούνται ανάλογα με τη διάρκεια, τη συχνότητα, το είδος των δραστηριοτήτων και τον βαθμό σύνδεσής τους με τους μαθησιακούς στόχους.

Σημαντική παιδαγωγική διάσταση των υπαίθριων χώρων είναι και η δυνατότητα ενσωμάτωσης της εκπαίδευσης για τη βιωσιμότητα. Σχολικοί κήποι, συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων, σημεία παρακολούθησης των καιρικών συνθηκών και διαδρομές παρατήρησης της βιοποικιλότητας μπορούν να λειτουργήσουν ως «ζωντανά εργαστήρια», στα οποία οι μαθητές συνδέουν τις θεωρητικές γνώσεις με άμεσα παρατηρήσιμες περιβαλλοντικές διαδικασίες. Η βιβλιογραφία για τους σχολικούς κήπους αναδεικνύει οφέλη ως προς την εμπλοκή των μαθητών, τη σύνδεσή τους με το περιβάλλον και τη βιωματική κατανόηση εννοιών, αλλά επισημαίνει συγχρόνως εμπόδια που σχετίζονται με τον διαθέσιμο χρόνο, τη συντήρηση, τη χρηματοδότηση και την ένταξη των δραστηριοτήτων στο πρόγραμμα σπουδών (Walshe et al., 2024). Κατά συνέπεια, η μετατροπή της αυλής σε σταθερό παιδαγωγικό πόρο προϋποθέτει κατάλληλο σχεδιασμό, οργανωτική υποστήριξη και επιμόρφωση των εκπαιδευτικών (Mann et al., 2022).

2.4.4 Βιοφιλικός σχεδιασμός σχολικών αυλών

Το πλαίσιο του βιοφιλικού σχεδιασμού (biophilic design) προσφέρει ένα ιδιαίτερα χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση και τον επανασχεδιασμό σχολικών αυλών. Βιοφιλικός σχεδιασμός είναι η σκόπιμη ενσωμάτωση στοιχείων και προτύπων της φύσης -φυσικό φως, φυτεύσεις, νερό, φυσικά υλικά, οργανικές μορφές, μεταβλητότητα φωτός και σκιάς, θέες προς το τοπίο- σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, με στόχο

την υποστήριξη της υγείας, της ευημερίας και της γνωστικής λειτουργίας των χρηστών (Kellert, 2018; Children & NatureNetwork, 2020).

Ειδικά για τα σχολεία, πρόσφατες μελέτες προτείνουν συγκεκριμένα βιοφιλικά πρότυπα για κοινόχρηστους χώρους, τα οποία φαίνεται να συνδέονται με μειωμένα επίπεδα άγχους και καταθλιπτικής συμπτωματολογίας στους εφήβους, όπως πλούσια φύτευση, θέες προς πράσινο, χρήση φυσικών υλικών, ποικιλία υφών και μορφών και δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε πιο «ήσυχες» και πιο «δραστήριες» ζώνες (Kim, 2025). Σχολικές μονάδες που υιοθετούν συστηματικά βιοφιλικές αρχές, μέσω πράσινων στεγών, υπαίθριων τάξεων εντός φυτεμένων κήπων, διαδρομών σε φυσικά τοπία και υλικών που παραπέμπουν σε τοπικά οικοσυστήματα, παρουσιάζονται συχνά στη βιβλιογραφία ως παραδείγματα όπου η βιωσιμότητα και η παιδαγωγική ποιότητα συνυφάνονται (An Innovative School Design, 2022).

Στην περίπτωση της σχολικής αυλής, η εφαρμογή των αρχών του βιοφιλικού σχεδιασμού μπορεί να περιλαμβάνει:

- ποικιλία φυτεύσεων, όπως δέντρα, θάμνους, χαμηλή βλάστηση και σχολικούς κήπους,
- χρήση φυσικών υλικών, όπως ξύλο, λίθος και χώμα, σε συνδυασμό με τα αναγκαία τεχνητά στοιχεία,
- παρουσία στοιχείων νερού και φυσικών διεργασιών,
- διαδρομές εξερεύνησης και χώρους με διαφορετικό βαθμό ανοικτότητας ή απομόνωσης,
- ευκαιρίες πολυαισθητηριακής εμπειρίας μέσω ήχων, υφών, οσμών, χρωμάτων και μεταβολών του φυσικού φωτός.

Τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να ενισχύσουν την ποικιλία των χωρικών εμπειριών και να προσφέρουν στα παιδιά περισσότερες δυνατότητες εξερεύνησης, αλληλεπίδρασης και μη προκαθορισμένου παιχνιδιού (Herrington & Lesmeister, 2006; Kellert, 2018). Ο βιοφιλικός σχεδιασμός, επομένως, δεν περιορίζεται στην προσθήκη βλάστησης, αλλά προϋποθέτει μια συνολική προσέγγιση της σχέσης μεταξύ φυσικού και δομημένου περιβάλλοντος, των οπτικών και λειτουργικών συνδέσεων με τη φύση και των

δυνατοτήτων που παρέχονται στα παιδιά για άμεση και πολυαισθητηριακή επαφή με αυτήν (Kellert, 2018; Lanzaro & Ucci, 2024).

Η προσθήκη φυσικών στοιχείων, η χωρική ποικιλία, η συνδεσιμότητα και οι δυνατότητες εξερεύνησης αποτελούν βασικούς άξονες του σχεδιασμού υπαίθριων χώρων για παιδιά κατά τους Herrington και Lesmeister. Η πιο πρόσφατη έρευνα για τα σχολικά περιβάλλοντα αντιμετωπίζει επίσης τον βιοφιλικό σχεδιασμό ως ευρύτερη σύνδεση με τη φύση και όχι απλώς ως παρουσία φυτών.

2.4.5 Ασφάλεια, ένταξη και προσβασιμότητα: προς μια «συμπεριληπτική» σχολική αυλή

Η συζήτηση για τις σχολικές αυλές δεν μπορεί να παρακάμπτει ζητήματα ασφάλειας, ένταξης και προσβασιμότητας. Η διεθνής βιβλιογραφία για τον σχεδιασμό συμπεριληπτικών παιδικών χαρών (inclusive playgrounds) υπογραμμίζει ότι ο υπαίθριος χώρος πρέπει να σχεδιάζεται με βάση τις αρχές του καθολικού σχεδιασμού (universal design), ώστε να είναι προσβάσιμος και λειτουργικός για όσο το δυνατόν ευρύτερο φάσμα παιδιών, με και χωρίς αναπηρίες, με διαφορετικά επίπεδα κινητικότητας, αισθητηριακές ιδιαιτερότητες ή αναπτυξιακές δυσκολίες (United Nations Children's Fund (UNICEF), 2021; Rogers, 2019; Moore et al., 2023).

Κατευθυντήριοι οδηγοί, όπως ο GoodPracticeGuide on Building an Inclusive Playground της UNICEF ή εξειδικευμένα εγχειρίδια καθολικού σχεδιασμού για παιδικές χαρές, επισημαίνουν ότι η ένταξη δεν εξαντλείται στη δημιουργία ραμπών ή στην τοποθέτηση «ειδικού» εξοπλισμού. Αφορά τη συνολική διαμόρφωση της αυλής: τη συνέχεια των διαδρομών, τις επιφάνειες κύλισης, τις ζώνες ήσυχων δραστηριοτήτων, τη δυνατότητα συνένωσης παιδιών με διαφορετικές ικανότητες σε κοινές δραστηριότητες, την οπτική εποπτεία και την αντιληπτότητα του χώρου, καθώς και την αποφυγή σωματικών και ψυχολογικών φραγμών (UNICEF, 2021; PlayLSI, 2024; Bienenstock, 2024).

Η ασφάλεια, από την άλλη, δεν ταυτίζεται με την πλήρη εξάλειψη κάθε πρόκλησης από τον χώρο. Η διεθνής βιβλιογραφία υποστηρίζει την ανάγκη διαμόρφωσης περιβαλλόντων που είναι ασφαλή, αλλά παράλληλα παρέχουν στα παιδιά τη δυνατότητα να αναλαμβάνουν και να διαχειρίζονται κινδύνους ανάλογους με την ηλικία και τις ικανότητές τους. Μέσα από το παιχνίδι αυτού του είδους, τα παιδιά μπορούν να δοκιμάζουν τα σωματικά τους όρια, να αναπτύσσουν αντιληπτικές και κινητικές

δεξιότητες, να ενισχύουν την αυτοπεποίθησή τους και να μαθαίνουν να αναγνωρίζουν και να αντιμετωπίζουν πιθανές επικίνδυνες καταστάσεις (Brussoni et al., 2012, 2015; Sandseter & Kennair, 2011). Η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει τη διάκριση μεταξύ των προκλήσεων που το παιδί μπορεί να αντιληφθεί και να αξιολογήσει και των μη εμφανών κινδύνων που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή βλάβη. Παράλληλα, απαιτεί προσεκτική επιλογή υλικών και επιφανειών, χρήση δαπέδων απορρόφησης των επιπτώσεων στις ζώνες πιθανής πτώσης και σαφή χωρική οργάνωση των δραστηριοτήτων, ώστε να περιορίζονται οι σοβαροί τραυματισμοί και οι επικίνδυνες συγκρούσεις χωρίς να ακυρώνεται η παιγνιώδης και διερευνητική λειτουργία του χώρου (European Committee for Standardization, 2023).

Τέλος, η έννοια της συμπερίληψης επεκτείνεται και σε λιγότερο ορατές μορφές διαφοροποίησης: παιδιά που ανήκουν σε μειονοτικές ή μεταναστευτικές ομάδες, παιδιά με διαφορετικά πολιτισμικά υπόβαθρα ή με εμπειρίες σχολικού εκφοβισμού. Ο σχεδιασμός της αυλής μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία μικρών, προστατευμένων χώρων για ήσυχες δραστηριότητες, σε χώρους συλλογής και συνεργασίας, καθώς και σε κατανομές που δεν ευνοούν αποκλειστικά τα ανταγωνιστικά ομαδικά αθλήματα. Μελέτες για τις αυλές ως συμπεριληπτικούς χώρους καταδεικνύουν ότι ο τρόπος διαμόρφωσης επηρεάζει το ποιοι «χωράνε» στην καθημερινή ζωή της αυλής και ποιοι τείνουν να περιθωριοποιούνται (Moore et al., 2023).

2.5 Κριτήρια αξιολόγησης της βιωσιμότητας σχολικών κτιρίων και αυλών

Η συζήτηση για τα «βιώσιμα» ή «πράσινα» σχολικά κτίρια έχει συνδεθεί με την ανάπτυξη συστημάτων αξιολόγησης, τα οποία επιχειρούν να μετατρέψουν τις γενικές αρχές της βιωσιμότητας σε συγκεκριμένα κριτήρια και δείκτες. Διεθνή συστήματα, όπως τα LEED, BREEAM και DGNB, δεν ακολουθούν απολύτως ενιαία δομή ή στάθμιση, συγκλίνουν όμως στην αξιολόγηση παραμέτρων όπως η ενεργειακή απόδοση, η κατανάλωση νερού, τα υλικά, η διαχείριση αποβλήτων, η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, η χωροθέτηση και, σε διαφορετικό βαθμό, οι κοινωνικές και οικονομικές διαστάσεις της λειτουργίας του κτιρίου (Doan et al., 2017; Ferreira et al., 2023).

Στην περίπτωση των σχολικών κτιρίων, έχουν αναπτυχθεί ή προσαρμοστεί ειδικότερα εργαλεία αξιολόγησης, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαίτερες λειτουργικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές απαιτήσεις των εκπαιδευτικών υποδομών. Ενδεικτικά, η μεθοδολογία Sustainability Assessment of High School Buildings in Portugal (SAHSBPT) βασίστηκε στην προσαρμογή του Sustainable Building Tool (SBTool) για σχολεία δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης και διαμορφώθηκε μέσα από την εξέταση υφιστάμενων συστημάτων, όπως το LEED Building Design and Construction: Schools (LEED BD+C: Schools), το BREEAM Education και το SBTool για σχολικά κτίρια. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια, καθώς και δείκτες που αφορούν την ενεργειακή συμπεριφορά, τη χρήση πόρων, την ποιότητα των εσωτερικών χώρων και τη λειτουργία του σχολείου (Saraiva et al., 2019).

Ιδιαίτερη σημασία για την αξιολόγηση των σχολικών κτιρίων έχουν οι δείκτες περιβαλλοντικής άνεσης (*environmental comfort indicators*). Οι Saraiva et al. (2018) εντάσσουν σε αυτούς τη θερμική, οπτική, ακουστική και εργονομική άνεση, καθώς και την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, υπογραμμίζοντας ότι η ενεργειακή απόδοση δεν πρέπει να εξετάζεται ανεξάρτητα από την υγεία, την άνεση και τις ανάγκες των χρηστών του σχολικού περιβάλλοντος.

Με βάση τη διεθνή εμπειρία και το θεωρητικό πλαίσιο των προηγούμενων υποκεφαλαίων, τα κριτήρια αξιολόγησης της βιωσιμότητας των σχολικών κτιρίων και αυλών στην παρούσα εργασία οργανώνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- a) περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια,
- b) μικροκλιματικά κριτήρια και κριτήρια θερμικής άνεσης των υπαίθριων χώρων,
- c) λειτουργικά και χωρικά κριτήρια και
- d) κοινωνικά και παιδαγωγικά κριτήρια. Η τετραμερής αυτή διάρθρωση αποτελεί συνθετικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας και όχι αυτούσια αναπαραγωγή ενός συγκεκριμένου συστήματος πιστοποίησης.

2.5.1 Περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια

Τα περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια αφορούν κυρίως το σχολικό κτίριο ως τεχνικό και περιβαλλοντικό σύστημα, αλλά επεκτείνονται και στη διαχείριση των πόρων και στις επιπτώσεις του σε όλο τον κύκλο ζωής του. Τα εργαλεία αξιολόγησης σχολικών κτιρίων περιλαμβάνουν συνήθως δείκτες σχετικούς με την κατανάλωση ενέργειας και

νερού, την επιλογή υλικών, τη διαχείριση αποβλήτων, την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και την εφαρμογή παθητικών στρατηγικών σχεδιασμού (Saraiva et al., 2019).

- **Ενεργειακή απόδοση και κατανάλωση**

- ο Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας.
- ο Κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και λειτουργία του εξοπλισμού.
- ο Βαθμός αξιοποίησης παθητικών βιοκλιματικών στρατηγικών, όπως ο κατάλληλος προσανατολισμός, η σκίαση, ο φυσικός φωτισμός και ο φυσικός αερισμός.
- ο Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών συστημάτων.

- **Διαχείριση πόρων και κύκλος ζωής**

- ο Κατανάλωση πόσιμου και μη πόσιμου νερού και εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης, όπως αποδοτικά υδραυλικά συστήματα, συλλογή όμβριων υδάτων και επαναχρησιμοποίηση νερού.
- ο Επιλογή υλικών με βάση την ενσωματωμένη ενέργεια και τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους, τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης, την περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο υλικό και τις χαμηλές εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs).
- ο Ενσωμάτωση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (*Life Cycle Assessment- LCA*) και, όπου είναι δυνατόν, της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (*Life Cycle Costing- LCC*) στη λήψη αποφάσεων για το κέλυφος, τα υλικά και τις εγκαταστάσεις του κτιρίου (Pachta & Giourou, 2022; Saraiva et al., 2019). Η LCA επιτρέπει την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τα διαφορετικά στάδια ζωής του κτιρίου και αποτρέπει την εξέταση της λειτουργικής κατανάλωσης ως μοναδικού δείκτη περιβαλλοντικής απόδοσης.

- **Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος (IEQ)**

Η ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος (*Indoor Environmental Quality*- IEQ) συνδέεται με την περιβαλλοντική απόδοση του κτιρίου, αλλά και με την υγεία, την άνεση και τις συνθήκες μάθησης. Στους βασικούς δείκτες περιλαμβάνονται:

- οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ως ενδεικτικό μέτρο της επάρκειας του αερισμού, καθώς και οι συγκεντρώσεις σωματιδίων και άλλων εσωτερικών ρύπων,
- η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία κατά τις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας,
- τα επίπεδα φωτισμού, η οπτική άνεση και η αξιοποίηση του φυσικού φωτός,
- τα επίπεδα θορύβου, η ηχομόνωση και ο χρόνος αντήχησης των χώρων.

Η βιβλιογραφία αντιμετωπίζει την IEQ ως σύνθετη παράμετρο, η οποία περιλαμβάνει τουλάχιστον την ποιότητα του αέρα, τη θερμική, την οπτική και την ακουστική άνεση. Κατά συνέπεια, η αποτίμηση ενός σχολικού κτιρίου δεν πρέπει να στηρίζεται σε μία μόνο μέτρηση, αλλά στη συνδυαστική εξέταση των διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών και της επίδρασής τους στους χρήστες (Karoor et al., 2021; Saraiva et al., 2018; Toyinbo, 2023).

Σε επίπεδο συνολικής αξιολόγησης, η ενεργειακή επίδοση πρέπει να εξετάζεται παράλληλα με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, η αύξηση της αεροστεγανότητας μπορεί να περιορίσει τις θερμικές απώλειες, αλλά, όταν δεν συνοδεύεται από επαρκή και ελεγχόμενο αερισμό, ενδέχεται να οδηγήσει σε αυξημένες συγκεντρώσεις CO₂ και άλλων ρύπων. Επομένως, ο στόχος δεν είναι απλώς η μείωση της κατανάλωσης, αλλά η επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας με παράλληλη διασφάλιση της υγείας και της άνεσης των μαθητών και των εκπαιδευτικών (Karoor et al., 2021; Toyinbo, 2023).

2.5.2 Μικροκλιματικά κριτήρια και θερμική άνεση στις αυλές

Στις σχολικές αυλές και στους λοιπούς υπαίθριους χώρους, τα μικροκλιματικά κριτήρια αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς αφορούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες

εκτίθενται καθημερινά τα παιδιά. Η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στη θερμοκρασία του αέρα, αλλά περιλαμβάνει την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία των επιφανειών, την υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου, τη διαθεσιμότητα σκιάς και τα χαρακτηριστικά των υλικών και της βλάστησης. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν από κοινού τη θερμική καταπόνηση, ενώ τα παιδιά θεωρούνται περισσότερο ευάλωτα στις υψηλές θερμοκρασίες από τους ενήλικες (Antoniadis et al., 2020).

Ενδεικτικά, τα μικροκλιματικά κριτήρια μπορούν να οργανωθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Χωρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά**
 - Αναλογία σκληρών και αδιαπέρατων επιφανειών προς φυτεμένες ή υδατοπερατές επιφάνειες.
 - Ποσοστό και κατανομή της σκιασμένης επιφάνειας κατά τις ώρες λειτουργίας του σχολείου και κατά τις θερμότερες περιόδους του έτους.
 - Επίδραση της γεωμετρίας των κτιρίων, των περιμετρικών εμποδίων και των στεγαστρών στον ηλιασμό και στην κίνηση του αέρα.
- **Μικροκλιματικές συνθήκες**
 - Θερμοκρασία αέρα και θερμοκρασία επιφανειών σε αντιπροσωπευτικά σημεία της αυλής.
 - Σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου και έκθεση στην άμεση ή διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.
 - Διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ φυτεμένων, σκιασμένων και σκληρών επιφανειών.
 - Χρήση σύνθετων δεικτών εξωτερικής θερμικής άνεσης, όπως ο Παγκόσμιος Δείκτης Θερμικού Κλίματος (*Universal Thermal Climate Index- UTCI*) και η Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία (*Physiological Equivalent Temperature- PET*), εφόσον διατίθενται τα αναγκαία δεδομένα.
- **Πράσινες και τεχνικές παρεμβάσεις**
 - Ποσοστό και κατανομή της δενδρώδους και θαμνώδους βλάστησης.

- ο Παρουσία φυτεμένων νησίδων, υδατοπερατών επιφανειών και στοιχείων φυσικής σκίασης.
- ο Χρήση τεχνητών στεγάστρων, κατάλληλων υλικών επίστρωσης και, όπου είναι εφικτό, στοιχείων νερού.
- ο Συνδυαστική επίδραση των παραπάνω παρεμβάσεων στη μείωση της θερμικής καταπόνησης.

Μελέτες σε σχολικές αυλές με μεσογειακές κλιματικές συνθήκες δείχνουν ότι η προσθήκη δέντρων και στεγάστρων και η αντικατάσταση τμημάτων των σκληρών επιφανειών με πράσινες επιφάνειες μπορούν να βελτιώσουν τις μικροκλιματικές συνθήκες. Η αποτελεσματικότητα, ωστόσο, εξαρτάται από τη γεωμετρία της αυλής, τη θέση και την έκταση της σκίασης, το είδος της φύτευσης και τις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Επομένως, δεν είναι σκόπιμο να καθορίζονται γενικά και ενιαία ποσοστά πρασίνου ή σκίασης χωρίς ειδική ανάλυση της κάθε περίπτωσης (Antoniadis et al., 2018, 2020).

2.5.3 Λειτουργικά και χωρικά κριτήρια

Τα λειτουργικά και χωρικά κριτήρια αφορούν τον βαθμό στον οποίο το σχολικό κτίριο και η αυλή υποστηρίζουν την καθημερινή λειτουργία, την ασφαλή κίνηση, την εποπτεία και την ευέλικτη χρήση των χώρων. Στα συστήματα αξιολόγησης σχολικών κτιρίων, οι σχετικές παράμετροι εξετάζονται παράλληλα με τα περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια, καθώς η βιωσιμότητα ενός σχολείου δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική του απόδοση, αλλά και από τη δυνατότητα των χρηστών να αξιοποιούν αποτελεσματικά τους χώρους του (Saraiva et al., 2019).

Ενδεικτικά, τα λειτουργικά και χωρικά κριτήρια μπορούν να περιλαμβάνουν:

- **Οργάνωση χώρων και ροές κίνησης**
 - ο Σαφή διάκριση των επιμέρους λειτουργικών ζωνών, όπως οι είσοδοι, οι αίθουσες, οι χώροι συγκέντρωσης, οι υπαίθριοι χώροι και οι βοηθητικές εγκαταστάσεις.
 - ο Συνέχεια και επάρκεια των διαδρομών κίνησης.
 - ο Περιορισμό των σημείων σύγκρουσης, συμφόρησης ή ανεπαρκούς οπτικής εποπτείας.

- ο Άμεση και ασφαλή σύνδεση μεταξύ των εσωτερικών χώρων, της αυλής και των ενδιάμεσων ημιυπαίθριων ζωνών.
- **Ευελιξία και πολλαπλότητα χρήσεων**
 - ο Δυνατότητα προσαρμογής των εσωτερικών και υπαίθριων χώρων σε διαφορετικές δραστηριότητες.
 - ο Ύπαρξη περιοχών για ατομική και ομαδική εργασία, κίνηση, παιχνίδι, ανάπαυση και ήσυχες δραστηριότητες.
 - ο Παρουσία υπαίθριων τάξεων, κήπων και σκιασμένων χώρων διδασκαλίας ή εργαστηριακών δραστηριοτήτων.
- **Υποστήριξη βιώσιμων πρακτικών**
 - ο Κατάλληλοι χώροι για τη συλλογή και προσωρινή αποθήκευση ανακυκλώσιμων υλικών.
 - ο Πρόσβαση σε σημεία νερού και αποθηκευτικούς χώρους για τη λειτουργία σχολικών κήπων και περιβαλλοντικών δραστηριοτήτων.
 - ο Δυνατότητα ασφαλούς συντήρησης των φυτεύσεων και των λοιπών περιβαλλοντικών εγκαταστάσεων.

Η ύπαρξη ενός πράσινου ή κατάλληλα διαμορφωμένου υπαίθριου χώρου δεν εξασφαλίζει από μόνη της την παιδαγωγική του αξιοποίηση. Η προσβασιμότητα, η χωρική οργάνωση, η διαθεσιμότητα εξοπλισμού, η λειτουργική υποστήριξη και η προετοιμασία των εκπαιδευτικών επηρεάζουν ουσιαστικά το κατά πόσο η αυλή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως περιβάλλον μάθησης (Van Dijk-Wesselius et al., 2020).

Τα συγκεκριμένα κριτήρια αξιολογούνται κυρίως ποιοτικά, με βάση κατόψεις, φωτογραφίες, τεχνικές περιγραφές και, όπου είναι διαθέσιμη, επιτόπια παρατήρηση. Ο ποιοτικός χαρακτήρας τους δεν περιορίζει τη σημασία τους, καθώς αποτυπώνουν κατά πόσο η χωρική διαμόρφωση υποστηρίζει ή δυσχεραίνει τη βιώσιμη και παιδαγωγικά λειτουργική χρήση του σχολείου.

2.5.4 Κοινωνικά και παιδαγωγικά κριτήρια

Η κοινωνική και παιδαγωγική διάσταση της αξιολόγησης αφορά τον βαθμό στον οποίο το σχολικό κτίριο και η αυλή υποστηρίζουν την υγεία, την ευημερία, την ένταξη, τη συμμετοχή και τη μάθηση των παιδιών. Η ποιότητα των εσωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών συνδέεται με την υγεία και τη μαθησιακή εμπειρία των μαθητών, ενώ οι πράσινες σχολικές αυλές μπορούν να προσφέρουν ευκαιρίες φυσικής δραστηριότητας, γνωστικής ανάπτυξης και κοινωνικής αλληλεπίδρασης (Toyinbo, 2023; Van den Bogerd et al., 2023).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τα κοινωνικά και παιδαγωγικά κριτήρια μπορούν να εξειδικευθούν ως εξής:

- **Υγεία και ευημερία**
 - Συνθήκες θερμικής, οπτικής και ακουστικής άνεσης και ποιότητας του αέρα.
 - Παρουσία σκιάς, πρασίνου και χώρων ανάπαυσης.
 - Δυνατότητα ασφαλούς φυσικής δραστηριότητας και επαφής με φυσικά στοιχεία.
 - Αντιληπτή άνεση και ικανοποίηση των μαθητών και των εκπαιδευτικών, όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από χρήστες.
- **Προσβασιμότητα και συμπερίληψη**
 - Συνεχείς και προσβάσιμες διαδρομές προς τους κύριους εσωτερικούς και υπαίθριους χώρους.
 - Κατάλληλες επιφάνειες κίνησης, σημεία ανάπαυσης και σαφής χωρική οργάνωση.
 - Δυνατότητα συμμετοχής παιδιών με διαφορετικές κινητικές, αισθητηριακές ή αναπτυξιακές ανάγκες σε κοινές δραστηριότητες.
 - Συνύπαρξη δραστήριων και ήσυχων ζωνών, ώστε να μην ευνοείται αποκλειστικά ένας τύπος παιχνιδιού ή κοινωνικής συμπεριφοράς.

Η συμπερίληψη δεν εξαντλείται στην τοποθέτηση ραμπών ή ειδικού εξοπλισμού. Προϋποθέτει την εφαρμογή αρχών καθολικού σχεδιασμού στο σύνολο του υπαίθριου χώρου και τη διαμόρφωση κοινών ευκαιριών παιχνιδιού, κοινωνικοποίησης και μάθησης για όλα τα παιδιά (UNICEF, 2021a).

- **Παιδαγωγική αξιοποίηση του χώρου**

- ο Δυνατότητα πραγματοποίησης οργανωμένων ή ημι-οργανωμένων μαθησιακών δραστηριοτήτων στην αυλή.
- ο Παρουσία υπαίθριων τάξεων, σχολικών κήπων και χώρων περιβαλλοντικής παρατήρησης.
- ο Αξιοποίηση των περιβαλλοντικών εγκαταστάσεων του σχολείου, όπως των συστημάτων συλλογής όμβριων ή παραγωγής ενέργειας, ως εκπαιδευτικών μέσων.
- ο Σύνδεση του υπαίθριου χώρου με το πρόγραμμα σπουδών και τις διδακτικές πρακτικές των εκπαιδευτικών (Van Dijk-Wesselius et al., 2020).

- **Συμμετοχή των χρηστών και της κοινότητας**

- ο Συμμετοχή μαθητών, εκπαιδευτικών και γονέων στον σχεδιασμό ή στην αξιολόγηση παρεμβάσεων.
- ο Συνεκτίμηση των αναγκών διαφορετικών ομάδων χρηστών.
- ο Δυνατότητα ελεγχόμενης κοινοτικής χρήσης της αυλής, όταν αυτή είναι συμβατή με την ασφάλεια, τη λειτουργία και τις ανάγκες του σχολείου.

Η συμμετοχή των χρηστών είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν σχεδιάζονται συμπεριληπτικοί χώροι, καθώς επιτρέπει να εντοπιστούν ανάγκες και εμπόδια που δεν είναι πάντοτε εμφανή μέσα από τα αρχιτεκτονικά σχέδια (UNICEF, 2021a).

Στην παρούσα μελέτη, οι δείκτες που προϋποθέτουν ερωτηματολόγια, συνεντεύξεις, παρατηρήσεις συμπεριφοράς ή δεδομένα υγείας δεν αξιολογούνται άμεσα, καθώς δεν συλλέγονται πρωτογενή δεδομένα από μαθητές ή εκπαιδευτικούς. Διατηρούνται, ωστόσο, στο θεωρητικό πλαίσιο, ώστε να καταδεικνύεται τι θα έπρεπε να περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη κοινωνική και παιδαγωγική αξιολόγηση του σχολικού χώρου.

2.5.5 Προς ένα συνθετικό πλαίσιο αξιολόγησης για την παρούσα εργασία

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η παρούσα εργασία δεν υιοθετεί αυτούσιο κάποιο διεθνές σύστημα πιστοποίησης. Διαμορφώνει ένα συνθετικό θεωρητικό πλαίσιο, το οποίο αντλεί στοιχεία από τις προσεγγίσεις αξιολόγησης σχολικών κτιρίων, αλλά προσαρμόζεται στο αντικείμενο, στα διαθέσιμα δεδομένα και στους περιορισμούς της μελέτης περίπτωσης. Η προσαρμογή των κριτηρίων στις ιδιαίτερες συνθήκες των σχολικών κτιρίων αποτελεί βασική αρχή και άλλων εξειδικευμένων εργαλείων αξιολόγησης, όπως το SAHSBPT (Saraiva et al., 2019).

Σε θεωρητικό επίπεδο, το πλαίσιο οργανώνεται στις τέσσερις κατηγορίες που αναπτύχθηκαν προηγουμένως:

1. περιβαλλοντικά και ενεργειακά κριτήρια,
2. μικροκλιματικά κριτήρια και κριτήρια θερμικής άνεσης,
3. λειτουργικά και χωρικά κριτήρια,
4. κοινωνικά και παιδαγωγικά κριτήρια.

Οι κατηγορίες αυτές λειτουργούν ως συνολικό πλαίσιο κατανόησης της βιωσιμότητας και όχι ως αυτούσιο σύστημα αριθμητικής πιστοποίησης. Διακρίνονται, επίσης, οι δείκτες που θα μπορούσαν να αποτιμηθούν ποσοτικά σε μια πλήρη τεχνική μελέτη -όπως η ενεργειακή κατανάλωση, το ποσοστό σκίασης, οι θερμοκρασίες επιφανειών και οι δείκτες UTCI ή PET- από τις παραμέτρους που μπορούν πράγματι να αξιολογηθούν με το υλικό της παρούσας εργασίας.

Η μελέτη περίπτωσης βασίζεται σε αρχιτεκτονικά σχέδια, όψεις, φωτογραφίες, τεχνικές καταγραφές και κλιματικές πληροφορίες. Δεν περιλαμβάνει επιτόπιες μετρήσεις θερμοκρασίας, ακτινοβολίας, ποιότητας αέρα ή ενεργειακής κατανάλωσης, ούτε έρευνα με μαθητές και εκπαιδευτικούς. Κατά συνέπεια, δεν υπολογίζονται ποσοτικοί δείκτες θερμικής άνεσης και δεν αποδίδονται μη τεκμηριωμένες αριθμητικές τιμές σε παραμέτρους για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.

Στο εμπειρικό μέρος, το θεωρητικό πλαίσιο εξειδικεύεται σε πέντε λειτουργικά κριτήρια για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων που παράγονται από το ChatGPT και το Gemini:

- αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού,
- βιοκλιματική καταλληλότητα,
- τεχνική εφαρμοσιμότητα,
- αρχιτεκτονική συμβατότητα,
- τεκμηρίωση και αναγνώριση των περιορισμών.

Με τον τρόπο αυτό διατηρείται ο πολυκριτηριακός χαρακτήρας της βιωσιμότητας, χωρίς η προκαταρκτική αξιολόγηση των σεναρίων TN να παρουσιάζεται ως πλήρης ενεργειακή, μικροκλιματική ή αρχιτεκτονική μελέτη.

3.Τεχνητή Νοημοσύνη στον τομέα του δομημένου περιβάλλοντος

3.1 Βασικές κατηγορίες και αρχές λειτουργίας της TN

Η TN, στη σύγχρονη εκδοχή της, δεν αφορά μόνο «έξυπνες» αυτοματοποιήσεις, αλλά κυρίως υπολογιστικές μεθόδους που μαθαίνουν από δεδομένα, αναγνωρίζουν πρότυπα, προβλέπουν καταστάσεις και, πλέον, παράγουν νέο περιεχόμενο (π.χ. κείμενο, σενάρια, εναλλακτικές λύσεις) υπό συγκεκριμένους περιορισμούς. Στον χώρο Architecture Engineering Construction Operations (AECO), η αξία της TN προκύπτει επειδή οι αποφάσεις είναι πολυκριτηριακές (ενέργεια, θερμική/οπτική άνεση, κόστος, περιβαλλοντικό αποτύπωμα, λειτουργικότητα) και τα δεδομένα είναι μεγάλα, ετερογενή και καταναμεμημένα (μοντέλα BIM, προσομοιώσεις, αισθητήρες, τεχνικά τεύχη). Επομένως, η κατανόηση των βασικών κατηγοριών TN συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα τεκμηριωμένης ένταξής της σε ροές εργασίας και με τη ρεαλιστική αποτίμηση των ορίων της (Jordan & Mitchell, 2015).

3.1.1 Μηχανική μάθηση, βαθιά μάθηση και βασικές μορφές «μάθησης»

Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning, ML) αποτελεί τον κύριο μηχανισμό μέσω του οποίου πολλά συστήματα TN «βελτιώνονται» από εμπειρία/δεδομένα, αντί να στηρίζονται αποκλειστικά σε ρητούς κανόνες. Σε ένα τυπικό πρόβλημα του δομημένου περιβάλλοντος, η ML επιδιώκει να μάθει μια σχέση μεταξύ δεδομένων εισόδου και εξόδου: για παράδειγμα, από χαρακτηριστικά κτιρίου/χρήσης/καιρού να προβλέψει κατανάλωση ενέργειας ή δείκτες άνεσης. Η προσέγγιση αυτή είναι κομβική, διότι επιτρέπει την αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων λειτουργίας και προσομοιώσεων για υποστήριξη απόφασης σε επίπεδο σχεδιασμού και λειτουργίας (Jordan & Mitchell, 2015).

Η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning, DL), ως υποσύνολο της ML, αξιοποιεί πολυεπίπεδανευρωνικά δίκτυα ώστε να μαθαίνει σύνθετες αναπαραστάσεις (representation learning), χωρίς να απαιτείται εξαντλητικός χειροκίνητος ορισμός χαρακτηριστικών. Η DL είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν τα δεδομένα είναι υψηλής πολυπλοκότητας ή μεγάλης κλίμακας (εικόνες/βίντεο, χρονοσειρές αισθητήρων, μεγάλοι όγκοι κειμένου), κάτι που απαντά συχνά στον AECO (Architecture, Engineering,

Construction, Operations): από επιθεωρήσεις εργοταξίου μέχρι δεδομένα Building Management Systems και αποθετήρια τεχνικής τεκμηρίωσης (Le Cun et al., 2015).

Ως προς το «πώς» μαθαίνουν τα μοντέλα, διακρίνονται τρεις βασικές οικογένειες, που έχουν άμεσες συνέπειες για το είδος των εφαρμογών στον κύκλο ζωής του κτιρίου:

- Επιβλεπόμενη μάθηση (supervised learning): εκπαίδευση με δεδομένα που συνοδεύονται από «ετικέτες» (labels). Χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων, για προβλέψεις κατανάλωσης, αξιολόγηση απόδοσης συστημάτων και ταξινομήσεις καταστάσεων λειτουργίας. Σε ανασκοπήσεις για “smart buildings” και ενεργειακή βελτιστοποίηση, εμφανίζεται ως βασικός κορμός εφαρμογών πρόβλεψης και διαχείρισης (Gunasinghalge et al., 2025).
- Μη επιβλεπόμενη μάθηση (unsupervised learning): εντοπίζει δομές, ομάδες και «ανωμαλίες» χωρίς προκαθορισμένες ετικέτες. Στο δομημένο περιβάλλον συνδέεται με ανίχνευση ασυνήθιστης συμπεριφοράς συστημάτων, αξιολόγηση ποιότητας δεδομένων, αλλά και με προσεγγίσεις προγνωστικής συντήρησης μέσω μοτίβων λειτουργίας (Adewale et al., 2024).
- Ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning, RL): μαθαίνει μέσω αλληλεπίδρασης με περιβάλλον, επιδιώκοντας μεγιστοποίηση «ανταμοιβής» (π.χ. ελαχιστοποίηση ενέργειας με διατήρηση άνεσης). Στον AECO και ειδικότερα στη λειτουργία κτιρίων, η RL συζητείται συχνά ως προσέγγιση για δυναμικό έλεγχο HVAC και προσαρμοστική διαχείριση ενέργειας, όπου οι αποφάσεις έχουν διαδοχικό χαρακτήρα (Gunasinghalge et al., 2025).

Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή μεθόδου δεν είναι «τεχνικό» ζήτημα μόνο: καθορίζει τι είδους δεδομένα απαιτούνται (labels ή όχι), τι είδους σφάλματα είναι ανεκτά, καθώς και ποια διαδικασία επαλήθευσης είναι αναγκαία όταν τα αποτελέσματα επηρεάζουν κρίσιμες αποφάσεις σχεδιασμού ή λειτουργίας.

3.1.2 Παραγωγικά μοντέλα, «μοντέλα βάσης» και μεγάλα γλωσσικά μοντέλα στον AECO

Η πρόσφατη εξέλιξη της TN δεν περιορίζεται στην πρόβλεψη ή την ταξινόμηση, επεκτείνεται σε παραγωγικά μοντέλα (generative models), τα οποία μπορούν να παράγουν νέο περιεχόμενο που μοιάζει με τα δεδομένα εκπαίδευσης. Ειδικότερα, τα μοντέλα βάσης (foundation models) αποτελούν μεγάλης κλίμακας μοντέλα που εκπαιδεύονται σε εκτεταμένα σύνολα δεδομένων και στη συνέχεια προσαρμόζονται (fine-tuning) ή

αξιοποιούνται με καθοδήγηση (prompting) σε ποικίλες εργασίες (Bommasani et al., 2021). Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models, LLMs), τα οποία ειδικεύονται στην κατανόηση και παραγωγή φυσικής γλώσσας (Zhao et al., 2023).

Στο πεδίο AECO, η σημασία των LLMs έγκειται στο ότι ένα μεγάλο μέρος της γνώσης και της διαδικασίας λήψης αποφάσεων «ζει» σε κείμενα: τεύχη προδιαγραφών, περιγραφές εργασιών, κανονισμούς, τεχνικές εκθέσεις, αναφορές ελέγχου, πρακτικά συντονισμού, καθώς και σε τεκμηρίωση που συνοδεύει τα ψηφιακά μοντέλα. Έτσι, τα LLMs μπορούν να λειτουργήσουν ως εργαλεία υποστήριξης σε δραστηριότητες όπως:

- (α) ανάκτηση και σύνοψη τεχνικής πληροφορίας,
- (β) προτυποποίηση/αναδιατύπωση απαιτήσεων,
- (γ) παραγωγή προσχεδίων τεχνικών κειμένων ή ελέγχων, και
- (δ) διευκόλυνση επικοινωνίας μεταξύ εμπλεκομένων με διαφορετικές τεχνικές γλώσσες.

Ωστόσο, η χρησιμότητα αυτή παραμένει λειτουργική μόνο όταν συνδυάζεται με διαδικασίες επαλήθευσης, δεδομένου ότι η παραγωγή «πληθοφανών» αλλά ανακριβών απαντήσεων αποτελεί δομικό κίνδυνο των LLMs εάν δεν υπάρχει αυστηρό πλαίσιο τεκμηρίωσης και ελέγχου (Zhao et al., 2023).

Συνακόλουθα, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τα LLMs νοούνται ως συμπληρωματικά εργαλεία εντός ενός ευρύτερου οικοσυστήματος TN: δεν αντικαθιστούν τις κλασικές μεθόδους ML/ DL που απαιτούνται για ποσοτικά προβλήματα απόδοσης (ενέργεια, άνεση, προσομοιώσεις), αλλά μπορούν να υποστηρίξουν την οργάνωση/αξιοποίηση γνώσης και να «γεφυρώσουν» τη φυσική γλώσσα με διαδικασίες τεκμηρίωσης και ελέγχου.

3.2 Εφαρμογές TN στον κύκλο ζωής του κτιρίου

Η αξία της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στο δομημένο περιβάλλον αποτυπώνεται ουσιαστικά όταν χαρτογραφείται κατά στάδιο κύκλου ζωής (σχεδιασμός-κατασκευή-λειτουργία/συντήρηση) και κατά είδος απόφασης (πρόβλεψη, έλεγχος, βελτιστοποίηση, αυτοματοποίηση τεκμηρίωσης). Με αυτόν τον τρόπο η TN δεν αντιμετωπίζεται ως «ενιαία λύση», αλλά ως σύνολο τεχνικών που ενισχύουν, σε διαφορετικούς χρόνους και με διαφορετικές απαιτήσεις αξιοπιστίας, τις διαδικασίες που καθορίζουν τη βιωσιμότητα:

κατανάλωση ενέργειας, εκπομπές/άνθρακας, θερμική-οπτική άνεση, υλικά/πόροι, λειτουργική ανθεκτικότητα και κόστος κύκλου ζωής. Συστηματικές ανασκοπήσεις καταγράφουν ότι οι εφαρμογές TN εμφανίζουν μεγαλύτερη ωριμότητα (και καλύτερη μετρησιμότητα αποτελέσματος) στη λειτουργία/ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται ραγδαία η ερευνητική και πρακτική δραστηριότητα σε ροές σχεδιασμού και σε ψηφιακές υποδομές τύπου BIM/ψηφιακού διδύμου. (Adewale et al., 2024).

3.2.1 Στάδιο σχεδιασμού: από «έλεγχο απόδοσης» σε performance-driven παραγωγή λύσεων

Στον σχεδιασμό, η TN χρησιμοποιείται κυρίως για να επιταχύνει την εξερεύνηση του χώρου λύσεων και να μετατρέψει την απόδοση (ενέργεια, άνεση, φωτισμός, άνθρακας, οικονομία) σε ρητά βελτιστοποιήσιμους στόχους. Η σύγχρονη βιβλιογραφία μιλά για μετάβαση από τον εκ των υστέρων έλεγχο (post-hoc performance check) σε performance-driven generative design, όπου ο σχεδιασμός οργανώνεται ως «κλειστός βρόχος»:

- (α) παραμετρικό/αλγοριθμικό μοντέλο,
- (β) προσομοίωση ή εκτίμηση απόδοσης,
- (γ) αλγοριθμική αναζήτηση/βελτιστοποίηση, και
- (δ) επανάληψη μέχρι να εντοπιστούν λύσεις που ισορροπούν ανταγωνιστικά κριτήρια. (Huang et al., 2025).

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώιμο στάδιο (concept/ schematic design), η TN συνδέεται συνήθως με αποφάσεις που «κλειδώνουν» μεγάλο μέρος της τελικής απόδοσης: προσανατολισμός, μορφολογία/μάζα, λόγος ανοιγμάτων, σκίαση, βασική οργάνωση όγκων και κελύφους. Εκεί εμφανίζονται τρεις χαρακτηριστικές κατευθύνσεις εργασίας:

- Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με εξελικτικούς αλγορίθμους: παράγονται πολλές εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις και αξιολογούνται ταυτόχρονα με βάση διαφορετικά κριτήρια, όπως η ενεργειακή κατανάλωση, ο κίνδυνος υπερθέρμανσης και η επάρκεια του φυσικού φωτισμού. Επειδή η βελτίωση ενός κριτηρίου μπορεί να επιδεινώσει κάποιο άλλο, το σύστημα δεν καταλήγει υποχρεωτικά σε μία μοναδική «βέλτιστη» λύση. Αντίθετα, παρουσιάζει ένα σύνολο ισορροπημένων εναλλακτικών, στις οποίες καμία λύση δεν υπερέρχει απόλυτα σε όλα τα κριτήρια. Το σύνολο αυτό ονομάζεται μέτωπο Pareto και

επιτρέπει στον μελετητή να επιλέξει τη λύση που ανταποκρίνεται καλύτερα στις προτεραιότητες του έργου (Huang et al., 2025).

- Surrogate/Bayesian optimization: όταν οι προσομοιώσεις είναι ακριβές/βαριές, εκπαιδεύονται «υποκατάστατα» μοντέλα που προσεγγίζουν την απόδοση και επιτρέπουν ταχύτερη αναζήτηση, με έμφαση στην αποδοτική δειγματοληψία. (Huang et al., 2025).
- Data- model- driven generative approaches: χρήση ML για να παραχθούν ή να ιεραρχηθούν λύσεις με βάση δεδομένα προηγούμενων σχεδίων/προσομοιώσεων, με στόχο την ταχύτερη σύγκλιση σε «καλές» περιοχές του χώρου λύσεων. (Huang et al., 2025).

Σε πιο «στοχευμένες» εφαρμογές, η γενετική/υπολογιστική παραγωγή λύσεων έχει ανασκοπηθεί ειδικά ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα, επισημαίνοντας ότι η πραγματική προστιθέμενη αξία προκύπτει όταν οι μέθοδοι παραγωγής συνδέονται με σαφείς δείκτες και με προσβάσιμες ροές γνώσης/εργαλείων, ώστε να μην απαιτείται «μη ειδικός» να χειριστεί υπερβολικά πολύπλοκες προσεγγίσεις. (Suphavarophas et al., 2024).

Στο πιο ώριμο στάδιο (detailed design), η TN μπορεί να υποστηρίξει: (α) επιλογές υλικών/συστήματος κελύφους με βάση δεδομένα απόδοσης, (β) εκτιμήσεις ανθρακικού αποτυπώματος και κύκλου ζωής, και (γ) ενσωμάτωση λογικής «σχεδιασμού για λειτουργία» (design for operations), ώστε οι επιλογές να ευθυγραμμίζονται με απαιτήσεις συντήρησης, παρακολούθησης και αναβάθμισης. Για να γίνει αυτό συστηματικά, κρίσιμη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη δομημένων δεδομένων (π.χ. BIM) που μπορούν να τροφοδοτήσουν υπολογιστικά την αξιολόγηση βιωσιμότητας. (Berges-Alvarez et al., 2024).

3.2.2 Στάδιο κατασκευής: πρόβλεψη, έλεγχος, αυτοματοποίηση ροών και μείωση σπατάλης

Στην κατασκευή, η TN εφαρμόζεται λιγότερο ως «σχεδιαστική γενεσιουργία» και περισσότερο ως μηχανισμός διαχείρισης πολυπλοκότητας: μεταβλητότητα εργοταξίου, αβεβαιότητα χρόνων, αλληλεξάρτηση συνεργείων, δυναμικοί κίνδυνοι, ποιότητα εκτέλεσης και τεκμηρίωση προόδου. Μια κεντρική επισκόπηση στον χώρο Construction Engineering and Management καταγράφει ότι τα οφέλη της TN μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις θεμελιώδεις λειτουργίες: μοντελοποίηση/αναγνώριση προτύπων,

πρόβλεψη και βελτιστοποίηση, και ότι οι εφαρμογές επεκτείνονται από την αναπαράσταση γνώσης και τη συγχώνευση πληροφορίας έως computer vision, Natural Language Processing (NLP), ευφυή βελτιστοποίηση και processmining. (Pan&Zhang, 2021).

Με πρακτικούς όρους, αυτό μεταφράζεται σε:

- Παρακολούθηση προόδου και ποιοτικός έλεγχος: χρήση εικόνας/βίντεο/αισθητήρων για σύγκριση «πραγματικού» με «σχεδιασμένο» (as built vs as planned), εντοπισμό αποκλίσεων, έλεγχο συμμόρφωσης σε επιμέρους εργασίες και τεκμηρίωση προόδου. Η αξιοπιστία τέτοιων εφαρμογών αυξάνεται όταν στηρίζονται σε σαφείς ψηφιακές αναπαραστάσεις και σε οργανωμένες ροές πληροφορίας. (Pan & Zhang, 2021).
- Πρόβλεψη καθυστερήσεων/κινδύνων και υποστήριξη αποφάσεων: μοντέλα που αξιοποιούν ιστορικά δεδομένα έργων (και ενημερώσεις πεδίου) για να εκτιμούν πιθανές αποκλίσεις κόστους/χρόνου, ή να αναδεικνύουν σημεία υψηλού ρίσκου. (Pan & Zhang, 2021).
- Βελτιστοποίηση πόρων και logistics: βελτίωση κατανομής συνεργείων/εξοπλισμού, ροών υλικών, αλληλουχίας εργασιών και οργάνωσης εργοταξίου, με στόχο τη μείωση αναμονών, επαναλήψεων και σπατάλης. (Pan & Zhang, 2021).

Για τη βιωσιμότητα, η κρίσιμη συνεισφορά στο στάδιο κατασκευής είναι έμμεση αλλά σημαντική: λιγότερες επανακατασκευές, καλύτερος έλεγχος υλικών, μειωμένες αστοχίες και καλύτερη τεκμηρίωση οδηγούν σε μείωση αποβλήτων και «κρυφού» αποτυπώματος (ενέργεια/ υλικά/ μεταφορές). Ωστόσο, η ωφέλεια εξαρτάται από το αν τα μοντέλα τροφοδοτούνται από αξιόπιστα δεδομένα και αν εντάσσονται σε διαδικασίες που είναι οργανωτικά ώριμες-διαφορετικά, η TN παράγει «ενδείξεις» χωρίς δυνατότητα αξιοποίησης στην πράξη (Pan & Zhang, 2021; Adewale et al., 2024).

3.2.3 Στάδιο λειτουργίας/ συντήρησης: ενεργειακή βελτιστοποίηση, ανίχνευση ανωμαλιών και ψηφιακά δίδυμα

Στη λειτουργία, οι εφαρμογές TN έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να αξιολογηθούν με συνεχή, μετρήσιμα δεδομένα (ενέργεια, θερμοκρασίες, ποιότητα αέρα, ώρες λειτουργίας εξοπλισμού). Γι' αυτό και η βιβλιογραφία εμφανίζει υψηλή συγκέντρωση μελετών σε ενεργειακή βελτιστοποίηση «έξυπνων κτιρίων». Μια πρόσφατη συστηματική

ανασκόπηση και μετα-ανάλυση (με μεγάλο σώμα μελετών 2010-2024) προτείνει ταξινομικό πλαίσιο πέντε κατηγοριών εφαρμογών (predictive systems, adaptive control, pattern recognition, hybrid/ ensemble, edge Artificial Intelligence (edge AI)) και αναδεικνύει ότι οι προσεγγίσεις reinforcement learning και υβριδικές μέθοδοι παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με άλλες κατηγορίες. (Gunasinghalge et al., 2025).

Πέρα από την ενέργεια, δύο εφαρμογές είναι κρίσιμες για τη βιωσιμότητα και τη διαχείριση κύκλου ζωής:

1. Ανίχνευση βλαβών και προγνωστική συντήρηση (Predictive Maintenance - PdM): μοντέλα που εντοπίζουν πρόωρα «αποκλίσεις» στη συμπεριφορά εξοπλισμού (HVAC, αντλίες, ανεμιστήρες, αυτοματισμοί), ώστε να μειωθούν βλάβες, χρόνος εκτός λειτουργίας και ενεργειακές απώλειες. Η προγνωστική συντήρηση είναι κατ' εξοχήν πεδίο όπου η TN προσφέρει άμεση επιχειρησιακή ωφέλεια. (Adewale et al., 2024).
2. Ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins) ως λειτουργικό “interface”: η TN συχνά λειτουργεί καλύτερα όταν εντάσσεται σε αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου που ενοποιεί BIM-πληροφορία, δεδομένα λειτουργίας και κανόνες/διαδικασίες. Η σημασία της «πραγματικής» υλοποίησης (και όχι μόνο θεωρητικής υπόσχεσης) τεκμηριώνεται από μελέτες που πρωτοτυποποιούν και αξιολογούν ψηφιακά δίδυμα για προγνωστική συντήρηση σε πραγματικές εγκαταστάσεις, υποδεικνύοντας ότι η ωρίμανση εξαρτάται από επιλογές πλατφόρμας, διασύνδεση δεδομένων και αξιολόγηση χρηστικότητας.

Παράλληλα, προσεγγίσεις «οδικού χάρτη» για τυποποίηση της προγνωστικής συντήρησης μέσω ψηφιακών διδύμων επισημαίνουν την ανάγκη να οριστούν ρητά λειτουργικές και πληροφοριακές απαιτήσεις (τι δεδομένα απαιτούνται, πώς ρέουν, πώς τεκμηριώνονται) ώστε η αυτοματοποίηση να είναι κλιμακώσιμη και ελέγξιμη.

3.3 Τεχνητή Νοημοσύνη, BIM και βιώσιμος σχεδιασμός

Η σύζευξη Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) και Building Information Modeling (BIM) αποτελεί μία από τις πλέον κρίσιμες εξελίξεις για τη μετάβαση από έναν «περιγραφικό» ψηφιακό σχεδιασμό σε έναν «υπολογιστικά υποστηριζόμενο» σχεδιασμό, όπου η αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων γίνεται ταχύτερα, συστηματικότερα και με μεγαλύτερη

διαφάνεια ως προς τα κριτήρια. Το BIM λειτουργεί ως ενιαίο, αντικειμενο-στραφές αποθετήριο (γεωμετρία + ιδιότητες + σχέσεις), άρα ως κατάλληλη “ραχοκοκαλιά δεδομένων” πάνω στην οποία μπορούν να «κουμπώσουν» αλγόριθμοι TN για πρόβλεψη, βελτιστοποίηση και αυτοματοποιημένους ελέγχους. Στη διεθνή βιβλιογραφία, η TN στο περιβάλλον BIM αναδεικνύεται ως τάση που μετατοπίζει το επίκεντρο από την απλή μοντελοποίηση προς την αυτοματοποίηση ροών εργασίας (data extraction, classification, anomaly detection, decision support), με σαφή προσανατολισμό σε κύκλους ζωής και δείκτες βιωσιμότητας (Kutá & Faltejsek, 2025).

Στο πεδίο της βιωσιμότητας, η κύρια προστιθέμενη αξία του BIM έγκειται στο ότι «μεταφράζει» τις σχεδιαστικές αποφάσεις σε μετρήσιμα μεγέθη: ποσότητες υλικών, επιφάνειες/όγκους, δομικά συστήματα και τεχνικές προδιαγραφές, στοιχεία που είναι απαραίτητα για υπολογισμούς περιβαλλοντικού αποτυπώματος, κόστους κύκλου ζωής ή άλλων δεικτών (π.χ. ενσωματωμένο άνθρακα, ενεργειακή κατανάλωση). Ωστόσο, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η πλήρης ολοκλήρωση BIM με Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), δηλαδή ταυτόχρονη συνεκτίμηση περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής διάστασης παραμένει μερική, λόγω δυσκολιών δια λειτουργικότητας, αντιστοίχισης δεδομένων υλικών σε βάσεις LCA/ Environmental Product Declaration (EPD), διαφορών στα επίπεδα λεπτομέρειας (Level of Detail- LOD) και απουσίας πλήρως τυποποιημένων ροών εργασίας. (Berges-Alvarez et al., 2024).

Ενδεικτικά, δύο κατευθύνσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τον βιώσιμο σχεδιασμό:

- A. Αυτοματοποίηση σημασιολογικού εμπλουτισμού και συμμόρφωσης: Πλαίσια που αξιοποιούν Semantic Web τεχνολογίες και δομές Industry Foundation Classes (IFC) επιδιώκουν να μετατρέψουν το BIM από «μοντέλο σχεδίασης» σε «μοντέλο ελέγχου», όπου κανόνες (π.χ. απαιτήσεις προτύπων, ελάχιστες διαστάσεις, χωρικές σχέσεις, ιδιότητες υλικών) ελέγχονται αυτόματα μέσω οντολογιών και ερωτημάτων τύπου SPARQL Protocol and RDF Query Language (SPARQL). Αυτό είναι κρίσιμο όταν οι κανόνες βιωσιμότητας και ασφάλειας πρέπει να ενσωματωθούν σε επαναλήψιμη διαδικασία ελέγχου (και όχι σε αποσπασματικές επιθεωρήσεις) (Jia et al., 2025).
- B. Μετάβαση από “rule digitization” σε ερμηνεία κανόνων με Large Language Models (LLMs): Πρόσφατες προσεγγίσεις δείχνουν ότι τα LLMs μπορούν να ερμηνεύουν κανονιστικό κείμενο, να εντοπίζουν τις απαιτήσεις, να επιλέγουν

κατάλληλες διαδικασίες εξαγωγής δεδομένων από BIM και να παράγουν αναφορές συμμόρφωσης. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι μειώνει το κόστος «κωδικοποίησης κανόνων» (που συχνά αποτελεί το βασικό εμπόδιο για αυτοματοποίηση), ενώ διατηρεί τη δυνατότητα τεκμηριωμένης εξαγωγής συμπερασμάτων σε μορφή αναφοράς (Iversen & Huang, 2026).

Παράλληλα, μια δεύτερη μεγάλη συνιστώσα βιώσιμου σχεδιασμού αφορά την ενεργειακή απόδοση και τη δυνατότητα γρήγορης διερεύνησης εναλλακτικών στο πρώιμο στάδιο. Εδώ, η TN αξιοποιείται ως «επιταχυντής» εκτιμήσεων, ιδίως όταν οι κλασικές προσομοιώσεις (π.χ. λεπτομερής ενεργειακή προσομοίωση) είναι χρονοβόρες ή απαιτούν υψηλή εξειδίκευση. Πρόσφατες μελέτες προτείνουν BIM-Machine Learning πλαίσια για πρώιμη πρόβλεψη ενεργειακής επίδοσης, με σκοπό να υποστηριχθούν ταχείς σχεδιαστικοί κύκλοι και συγκρίσεις σεναρίων (π.χ. μεταβολές κελύφους, σκιάσεις, ανοίγματα, υλικά). (de Paula et al., 2026). Επιπλέον, εφαρμογές που συνδυάζουν παραμετρική αξιολόγηση και ML με BIM δεδομένα δείχνουν τη δυνατότητα συστηματικής διερεύνησης πολλών παραλλαγών σχεδιασμού, κάτι που συνδέεται άμεσα με πρακτικές βιώσιμης βελτιστοποίησης. (Tsikas et al., 2025).

Η τρίτη διάσταση, που συνδέεται με τη βιωσιμότητα ως απόδοση σε όλο τον κύκλο ζωής, αφορά την περίοδο λειτουργίας και συντήρησης (operation & maintenance). Σε αυτό το πεδίο, η έννοια του digital twin αναδεικνύεται ως επέκταση του BIM από «στατικό μοντέλο» σε «δυναμικό μοντέλο», που ενημερώνεται από δεδομένα χρήσης/αισθητήρων και υποστηρίζει αποφάσεις συντήρησης, ανίχνευση αποκλίσεων και καλύτερη διαχείριση πόρων. Μελέτες παρουσιάζουν συστήματα πραγματικού χρόνου για παρακολούθηση συντήρησης μέσω ενσωμάτωσης BIM και digital twin, υποδεικνύοντας πρακτικές οδούς για βιώσιμη λειτουργία υποδομών. (Yang et al., 2025). Η ίδια βιβλιογραφική γραμμή υποστηρίζεται και από ανασκοπήσεις σε επίπεδο εφαρμογών digital twins για predictive maintenance, όπου υπογραμμίζεται ότι η αξία προκύπτει όταν η ψηφιακή αναπαράσταση συνδέεται με μετρήσιμους δείκτες απόδοσης και με διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Μεθοδολογικά, η αποτελεσματικότητα του πλαισίου TN-BIM για βιωσιμότητα εξαρτάται από προϋποθέσεις που οφείλουν να δηλωθούν ρητά στο ερευνητικό κείμενο:

- Ποιότητα και πληρότητα δεδομένων: η TN δεν «αντισταθμίζει» ελλείψεις (π.χ. ασαφείς προδιαγραφές υλικών) αντίθετα, μπορεί να τις αναπαράγει ως σφάλματα εκτίμησης (Berges-Alvarez et al., 2024).
- Διαλειτουργικότητα (IFC, οντολογίες, εξαγωγές): κρίσιμη για να μεταφερθούν αξιόπιστα ιδιότητες/ ποσότητες σε εργαλεία ελέγχου, LCA ή αυτοματοποιημένης συμμόρφωσης (Jia et al., 2025).
- Επαληθευσιμότητα και τεκμηρίωση: ιδιαίτερα στις προσεγγίσεις που βασίζονται σε μεγάλα γλωσσικά μοντέλα, η παραγόμενη αναφορά συμμόρφωσης πρέπει να παρουσιάζει με σαφήνεια τις πηγές, τα δεδομένα και τα βήματα που οδήγησαν στα συμπεράσματά της. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την ορθότητα των αποτελεσμάτων και να διαπιστώσει εάν οι απαιτήσεις των κανονισμών έχουν ερμηνευθεί σωστά. Αντίθετα, μια απάντηση που εμφανίζει μόνο το τελικό συμπέρασμα, χωρίς να εξηγεί πώς αυτό προέκυψε, δεν παρέχει επαρκή ακαδημαϊκή ή τεχνική τεκμηρίωση (Iversen & Huang, 2026).
- Σαφής ορισμός δεικτών βιωσιμότητας: για να είναι συγκρίσιμα τα σενάρια σχεδιασμού (ενέργεια, άνθρακας, κόστος κύκλου ζωής, λειτουργικές επιπτώσεις), απαιτείται οριοθέτηση συστήματος/ υποθέσεων (Berges-Alvarez et al., 2024).

3.4 Generative design και υπολογιστική διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων

Η έννοια του generative design στον κτιριακό σχεδιασμό αποκτά σαφές επιστημονικό περιεχόμενο όταν εντάσσεται στο πλαίσιο του performance driven generative design (PDGD): ενός ολοκληρωμένου, «κλειστού βρόχου» σχήματος όπου:

- a) η γεωμετρία/τυπολογία παραμετροποιείται,
- b) η απόδοση αποτιμάται ποσοτικά (μέσω προσομοιώσεων ή υποδειγμάτων), και
- c) αλγοριθμικές μέθοδοι αναζήτησης/ βελτιστοποίησης παράγουν και φιλτράρουν εναλλακτικές λύσεις, έτσι ώστε οι στόχοι απόδοσης να οδηγούν (και όχι απλώς να «ελέγχουν») τη διαδικασία παραγωγής λύσεων (Huang et al., 2025).

Σύμφωνα με τη συστηματική επισκόπηση του Huang et al. (2025), το PDGD διαφοροποιείται από τον παραδοσιακό, εκ των υστέρων έλεγχο (post-hoc checking), επειδή οργανώνει την αναζήτηση λύσεων γύρω από ρητά διατυπωμένες αντικειμενικές συναρτήσεις και μετρικές (π.χ. ενέργεια, φυσικός φωτισμός, θερμική άνεση, άνθρακας, οικονομικά), ενώ αξιοποιεί παραμετρικές μεταβλητές που αντιστοιχούν σε πραγματικές

σχεδιαστικές αποφάσεις (όπως μορφολογία/ μάζα, κέλυφος, λόγος ανοιγμάτων, σκιάσεις, ανοιγόμενα, φωταγωγοί κ.ά.) (Huang et al., 2025).

3.4.1 Λογική βελτιστοποίησης και βασικός αγωγός εργασίας (workflow)

Ο τυπικός αγωγός PDGD μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- Παραμετροποίηση: ορισμός μεταβλητών σχεδιασμού (γεωμετρικές/ τυπολογικές, υλικών/ συστήματος, σκίασης κ.λπ.) και περιορισμών (κανονισμοί, λειτουργικές απαιτήσεις, κατασκευασιμότητα) (Huang et al., 2025).
- Αξιολόγηση απόδοσης: σύνδεση του παραμετρικού μοντέλου με προσομοιώσεις/μηχανές αξιολόγησης (ενεργειακές, φωτισμού, άνεσης). Η επισκόπηση αναδεικνύει ως «de facto» στοίβες εργαλείων την παραμετρική μοντελοποίηση (π.χ. Rhino/ Grasshopper) και μηχανές προσομοίωσης (π.χ. EnergyPlus, Radiance/ Daysim), μέσω ενδιάμεσων εργαλείων διαχείρισης κλιματικών/περιβαλλοντικών δεδομένων (π.χ. Ladybug/ Honeybee) (Huang et al., 2025).
- Αλγοριθμική αναζήτηση και βελτιστοποίηση: χρησιμοποιούνται υπολογιστικές μέθοδοι που παράγουν και συγκρίνουν μεγάλο αριθμό εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων με βάση περισσότερα από ένα κριτήρια, όπως η ενεργειακή κατανάλωση, ο φυσικός φωτισμός και η θερμική άνεση. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, όπως ο Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), βελτιώνουν σταδιακά τις εναλλακτικές λύσεις και καταλήγουν σε ένα σύνολο επιλογών στις οποίες κανένα κριτήριο δεν μπορεί να βελτιωθεί χωρίς να επιδεινωθεί κάποιο άλλο. Οι επιλογές αυτές ονομάζονται λύσεις Pareto και δεν αποτελούν μία μοναδική «βέλτιστη» λύση, αλλά διαφορετικούς αποδεκτούς συνδυασμούς των επιδιωκόμενων στόχων (Deb et al., 2002; Huang et al., 2025).
- Λήψη απόφασης: από το σύνολο των παραπάνω εναλλακτικών, ο μελετητής επιλέγει τη λύση που ανταποκρίνεται καλύτερα στις προτεραιότητες του έργου. Για παράδειγμα, μία λύση μπορεί να παρουσιάζει χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, αλλά να εξασφαλίζει λιγότερο φυσικό φωτισμό, ενώ μια άλλη μπορεί να προσφέρει καλύτερες συνθήκες φωτισμού με αυξημένες ανάγκες ψύξης. Η μέθοδος δεν επιλέγει αυτόματα μία λύση, αλλά καθιστά εμφανείς αυτούς τους συμβιβασμούς, ώστε η τελική απόφαση να είναι τεκμηριωμένη (Huang et al., 2025).

Η κεντρική μεθοδολογική αξία του PDGD δεν είναι ότι «βρίσκει μία βέλτιστη λύση», αλλά ότι καθιστά την απόφαση διαφανή: εμφανίζει το σύνολο των μη-κυριαρχούμενων εναλλακτικών και τις ανταλλαγές μεταξύ δεικτών. Η λογική αυτή ταιριάζει ιδιαίτερα σε πλαίσια βιώσιμου σχεδιασμού, όπου είναι σύνηθες να συγκρούονται στόχοι (π.χ. μέγιστος φυσικός φωτισμός μπορεί να αυξάνει το ψυκτικό φορτίο, ενώ η αύξηση μόνωσης μπορεί να επηρεάζει το ενσωματωμένο αποτύπωμα υλικών) (Huang et al., 2025).

3.4.2 Εργαλειοθήκη, αλγόριθμοι και «επιτάχυνση» του υπολογιστικού κόστους

Στην πράξη, η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στον κτιριακό σχεδιασμό γίνεται συχνά υπολογιστικά βαριά, επειδή κάθε αξιολόγηση εναλλακτικού σεναρίου μπορεί να απαιτεί πλήρη προσομοίωση. Η συστηματική επισκόπηση (Huang et al., 2025) δείχνει ότι, ακριβώς λόγω αυτού του κόστους, αναπτύσσονται δύο συμπληρωματικές κατευθύνσεις:

1. Εξελικτική πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση: χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που εξετάζουν πολλές εναλλακτικές λύσεις και επιδιώκουν να εντοπίσουν διαφορετικές ισορροπίες μεταξύ ανταγωνιστικών στόχων. Ο αλγόριθμος NSGA-II χρησιμοποιείται ευρέως επειδή μπορεί να παράγει, μέσα στην ίδια διαδικασία, ένα σύνολο λύσεων που προσεγγίζουν τις καλύτερες δυνατές ισορροπίες μεταξύ των κριτηρίων και παραμένουν αρκετά διαφορετικές μεταξύ τους, ώστε να προσφέρουν ουσιαστικές επιλογές στον μελετητή. Το σύνολο αυτό ονομάζεται μέτωπο Pareto (Deb et al., 2002). Ενδεικτική εφαρμογή αποτελεί η μελέτη των Tian et al. (2025), στην οποία αναπτύχθηκε ένα πλαίσιο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για το κέλυφος κατοικίας. Η παραμετρική μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με τα Rhino και Grasshopper, η ενεργειακή και θερμική προσομοίωση με τα Honeybee, Ladybug και EnergyPlus και η αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων με τον αλγόριθμο NSGA-II. Με τον τρόπο αυτό εξετάστηκαν συστηματικά διαφορετικές παθητικές παρεμβάσεις ως προς την ενεργειακή απόδοση, τη θερμική άνεση και το κόστος (Tian et al., 2025).
2. Surrogate models και Bayesian optimization για μείωση του αριθμού ακριβών προσομοιώσεων. Η επισκόπηση περιγράφει ως ιδιαίτερα διαδεδομένο μοτίβο το «μικρό δείγμα προσομοιώσεων εκπαίδευση υποκατάστατου (π.χ. eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), Support Vector Regression (SVR), Artificial Neural Network (ANN) ή Gaussian Process (GP)/ Kriging) ακολουθιακή επιλογή νέων

δειγμάτων (acquisition)», ώστε να προσεγγιστεί το Pareto-σύνολο με πολύ λιγότερες πλήρεις προσομοιώσεις (Huang et al., 2025).

Η σημασία των παραπάνω είναι διπλή: αφενός καθιστούν εφικτή την εφαρμογή PDGD σε «πραγματικού μεγέθους» προβλήματα (μεγάλους χώρους σχεδιασμού, συν-προσομοιώσεις), αφετέρου εισάγουν νέες απαιτήσεις τεκμηρίωσης, επειδή τα surrogate models χρειάζονται επικύρωση (σφάλματα πρόβλεψης, όρια γενίκευσης, αβεβαιότητα). Η ίδια επισκόπηση προτείνει έμφαση σε πρακτικές αναπαραγωγιμότητας και ρητή δήλωση υποθέσεων (καιρός, χρήσεις, συστήματα, στρατηγικές ελέγχου), διότι ασυνέπειες σε αυτές τις παραδοχές μπορούν να δημιουργήσουν «ψευδο-βελτιστοποιήσεις» (Huang et al., 2025).

3.4.3 Εστίαση στη βιωσιμότητα: τι βελτιστοποιείται και τι τεκμηριώνεται

Η βιβλιογραφία που εστιάζει ειδικά στην ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω generative design δείχνει ότι η έρευνα κινείται κυρίως γύρω από:

- Θερμική/ενεργειακή απόδοση ως κυρίαρχο πεδίο εφαρμογών (συχνά με συνδυασμούς με φυσικό φωτισμό).
- Εξελικτικούς αλγορίθμους ως συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο, με αυξητική χρήση παραμετρικών και «μικτών» (hybrid) προσεγγίσεων.
- Πρακτικό πρόβλημα σύγκρισης αποτελεσμάτων μεταξύ μελετών, επειδή οι δείκτες, οι μονάδες και τα σενάρια διαφέρουν, άρα η τεκμηρίωση πρέπει να δίνεται με σαφή ορισμό κριτηρίων και συνθηκών (Suphavarophas et al., 2024).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το κρίσιμο είναι να αναδειχθεί ότι το generative design δεν είναι «αισθητικό παιχνίδι μορφών», αλλά μεθοδολογία που όταν συνδέεται με κατάλληλες μετρικές, μπορεί να λειτουργήσει ως μηχανισμός τεκμηριωμένης βιωσιμότητας: ορίζει ποσοτικά τι σημαίνει «καλύτερη λύση», παρουσιάζει τα trade-offs και επιτρέπει αναπαραγωγίμη σύγκριση σεναρίων. (Huang et al., 2025; Suphavarophas et al., 2024).

3.5 Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (LLMs) στην αρχιτεκτονική πρακτική και στη διαχείριση πληροφορίας έργου

3.5.1 Μεγάλα γλωσσικά μοντέλα και πολυτροπική επεξεργασία

Η ανάπτυξη των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (*Large Language Models- LLMs*) εντάσσεται στο ευρύτερο πεδίο των μοντέλων βάσης (*foundation models*). Πρόκειται για μοντέλα μεγάλης κλίμακας, τα οποία εκπαιδεύονται σε εκτεταμένα σύνολα δεδομένων και μπορούν στη συνέχεια να αξιοποιηθούν σε διαφορετικές εργασίες μέσω κατάλληλων οδηγιών, προσαρμογής ή σύνδεσης με εξωτερικές πηγές πληροφορίας (Bommasani et al., 2021). Τα LLMs έχουν σχεδιαστεί κυρίως για την επεξεργασία και την παραγωγή φυσικής γλώσσας, επιτρέποντας στον χρήστη να διατυπώνει ερωτήματα, απαιτήσεις και περιορισμούς σε διαλογική μορφή και να λαμβάνει απαντήσεις χωρίς να χρειάζεται να χρησιμοποιεί εξειδικευμένη γλώσσα προγραμματισμού (Zhao et al., 2023).

Η σημασία των μοντέλων αυτών στον κλάδο της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής, των κατασκευών και της λειτουργίας των κτιρίων συνδέεται με το γεγονός ότι μεγάλο μέρος της πληροφορίας ενός έργου δεν βρίσκεται μόνο σε αριθμητικές βάσεις ή τρισδιάστατα μοντέλα. Περιλαμβάνεται επίσης σε τεχνικές εκθέσεις, προδιαγραφές, κανονισμούς, συμβατικά έγγραφα, πρακτικά, φωτογραφίες, σχέδια και περιγραφές της υφιστάμενης κατάστασης. Τα LLMs μπορούν να υποστηρίξουν την ανάκτηση, τη σύνθεση και την αναδιατύπωση αυτής της πληροφορίας, καθώς και την οργάνωσή της σε μορφές περισσότερο κατάλληλες για τη λήψη προκαταρκτικών αποφάσεων (Saka et al., 2024).

Νεότερα συστήματα επεκτείνουν τις γλωσσικές δυνατότητες μέσω της πολυτροπικής επεξεργασίας. Η πολυτροπικότητα αναφέρεται στη δυνατότητα ενός μοντέλου να λαμβάνει και να συσχετίζει διαφορετικούς τύπους δεδομένων, όπως κείμενο, εικόνες, πίνακες, διαγράμματα και ψηφιακά αρχεία. Στην αρχιτεκτονική, η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή το σχεδιαστικό πρόβλημα αποτυπώνεται ταυτόχρονα μέσα από λεκτικές απαιτήσεις, γεωμετρικές αναπαραστάσεις, κατόψεις, όψεις, φωτογραφίες και αριθμητικά δεδομένα. Η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι οι εφαρμογές παραγωγικής ΤΝ συγκεντρώνονται κυρίως στα αρχικά στάδια του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, όπου οι εικόνες αποτελούν κυρίαρχη μορφή εισόδου και εξόδου, ενώ αυξάνεται σταδιακά η χρήση συνδυασμένων και πολυτροπικών δεδομένων (Jang et al., 2025).

Η πολυτροπική λειτουργία επιτρέπει σε ένα μοντέλο να περιγράψει εμφανή χαρακτηριστικά ενός σχεδίου ή μιας φωτογραφίας, να συνδέσει οπτικές παρατηρήσεις με λεκτικές πληροφορίες και να οργανώσει τα δεδομένα σε μια ενιαία απάντηση. Για παράδειγμα, μπορεί να συσχετίσει τον προσανατολισμό μιας όψης με τη θέση των ανοιγμάτων, να αναγνωρίσει την παρουσία εξωτερικών ή εσωτερικών μέσων σκίασης και να συνδέσει τις παρατηρήσεις αυτές με γενικές αρχές ηλιοπροστασίας και φυσικού αερισμού. Η δυνατότητα αυτή δεν σημαίνει, ωστόσο, ότι το μοντέλο πραγματοποιεί ακριβή γεωμετρική ή τεχνική αποτύπωση. Η ανάλυση παραμένει εξαρτημένη από την ποιότητα, την ανάλυση, την πληρότητα και τη σαφήνεια των αρχείων που του παρέχονται.

Ιδιαίτερη σημασία έχει, επομένως, η διάκριση ανάμεσα στα πολυτροπικά LLMs και στα εξειδικευμένα συστήματα υπολογιστικής ανάλυσης. Ένα LLM μπορεί να περιγράψει ένα ορατό αρχιτεκτονικό στοιχείο ή να προτείνει μια εύλογη σχεδιαστική κατεύθυνση, αλλά δεν μπορεί μόνο από μια φωτογραφία να επιβεβαιώσει τις θερμοφυσικές ιδιότητες ενός υλικού, την κατασκευαστική κατάσταση ενός κουφώματος, τη στατική επάρκεια μιας σύνδεσης ή την πραγματική συμπεριφορά του χώρου σε συνθήκες καύσωνα. Αντίστοιχα, η ανάγνωση μιας κάτοψης δεν εξασφαλίζει ότι αναγνωρίζονται πάντοτε με ακρίβεια η κλίμακα, όλες οι διαστάσεις, τα υψόμετρα ή οι μη ορατές εγκαταστάσεις. Οι απαντήσεις πρέπει, συνεπώς, να αντιμετωπίζονται ως ερμηνείες του διαθέσιμου υλικού και όχι ως ισοδύναμο αυτοψίας ή τεχνικής μέτρησης.

3.5.2 Εφαρμογές στη διαχείριση πληροφορίας και στην αρχιτεκτονική πρακτική

Μία από τις περισσότερο άμεσες χρήσεις των LLMs στον κλάδο AECO αφορά τη διαχείριση της τεχνικής πληροφορίας. Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνοψη μεγάλων τεχνικών εγγράφων, την εξαγωγή απαιτήσεων, την ταξινόμηση παρατηρήσεων, την παραγωγή προσχεδίων αναφορών και τη σύγκριση διαφορετικών πηγών. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να μειώσει τον χρόνο που απαιτείται για την αρχική οργάνωση ενός προβλήματος, ιδιαίτερα όταν οι πληροφορίες είναι διάσπαρτες σε πολλά αρχεία και διαφορετικές μορφές. Οι εφαρμογές αυτές δεν αντικαθιστούν τον έλεγχο των πρωτογενών εγγράφων, αλλά μπορούν να διευκολύνουν τον εντοπισμό των σημείων που χρειάζονται περαιτέρω εξέταση (Saka et al., 2024).

Η σύνδεση των LLMs με δομημένα δεδομένα, όπως τα μοντέλα BIM, διευρύνει περαιτέρω τις δυνατότητες αυτές. Το BIM μπορεί να παρέχει συγκεκριμένες ιδιότητες για

τα δομικά στοιχεία, τις ποσότητες, τις χωρικές σχέσεις και τα υλικά, ενώ το γλωσσικό μοντέλο μπορεί να λειτουργεί ως διεπαφή φυσικής γλώσσας για την αναζήτηση και την οργάνωσή τους. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, το LLM δεν βασίζεται αποκλειστικά στη γενική γνώση που απέκτησε κατά την εκπαίδευσή του, αλλά μπορεί να αντλεί πληροφορίες από ένα συγκεκριμένο και ελεγχόμενο ψηφιακό περιβάλλον.

Προηγμένες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη μετατροπή λεκτικών οδηγιών σε ενέργειες δημιουργίας ή τροποποίησης μοντέλων BIM. Το Text2BIM, για παράδειγμα, αξιοποιεί ένα πολυπρακτορικό πλαίσιο στο οποίο οι λεκτικές οδηγίες μετασχηματίζονται σε κώδικα και εκτελέσιμες ενέργειες μέσα σε λογισμικό μοντελοποίησης. Η προσέγγιση αυτή δείχνει ότι τα LLMs μπορούν να λειτουργούν ως ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ της σχεδιαστικής πρόθεσης και ενός δομημένου ψηφιακού μοντέλου, υπό την προϋπόθεση ότι τα παραγόμενα αποτελέσματα υποβάλλονται σε κανόνες ελέγχου ποιότητας (Du et al., 2026).

Αντίστοιχα, τα LLMs έχουν εξεταστεί στο πεδίο του αυτοματοποιημένου ελέγχου συμμόρφωσης. Σε τέτοιες εφαρμογές το μοντέλο χρησιμοποιείται για την ερμηνεία κανονιστικών διατάξεων, την επιλογή των αναγκαίων δεδομένων από ένα μοντέλο BIM, την εκτέλεση των σχετικών ελέγχων και τη σύνταξη αναφοράς. Η έρευνα των Iversen και Huang (2026) κατέγραψε υψηλή απόδοση σε συγκεκριμένες δοκιμές ερμηνείας και εκτέλεσης κανόνων. Το εύρημα αυτό αποδεικνύει τη χρησιμότητα των LLMs σε σαφώς οριοθετημένες και ελεγχόμενες εργασίες, αλλά δεν σημαίνει ότι μπορούν να αντικαταστήσουν τις αρμόδιες αρχές ή τους επαγγελματίες που φέρουν την ευθύνη της τελικής συμμόρφωσης.

Πέρα από τη διαχείριση εγγράφων και δεδομένων, τα LLMs μπορούν να λειτουργήσουν ως συνεργατικά εργαλεία κατά τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Η συνεισφορά τους μπορεί να περιλαμβάνει την αποσαφήνιση του σχεδιαστικού προβλήματος, την οργάνωση των απαιτήσεων, τη δημιουργία καταλόγων πιθανών παρεμβάσεων και τη διερεύνηση διαφορετικών προτεραιοτήτων. Η διεθνής έρευνα δείχνει ότι η παραγωγική TN χρησιμοποιείται συχνότερα κατά τον αρχικό ή σχηματικό σχεδιασμό, όπου οι αποφάσεις είναι περισσότερο ανοικτές και εξετάζονται εναλλακτικές κατευθύνσεις, ενώ η χρήση της σε μεταγενέστερα στάδια με αυξημένες απαιτήσεις τεχνικής ακρίβειας παραμένει πιο περιορισμένη (Jang et al., 2025).

Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν ο στόχος δεν είναι η αυτόματη παραγωγή μιας τελικής λύσης, αλλά η διεύρυνση του πεδίου των επιλογών. Το LLM μπορεί να προτείνει διαφορετικές στρατηγικές, να οργανώσει τις προτάσεις σε επίπεδα παρέμβασης και να επισημαίνει πιθανά πλεονεκτήματα ή εμπόδια. Ο αρχιτέκτονας ή ο μηχανικός διατηρεί, ωστόσο, τον ρόλο του στον καθορισμό των κριτηρίων, στην απόρριψη μη κατάλληλων λύσεων και στη μετατροπή των γενικών κατευθύνσεων σε τεχνικά εφαρμόσιμες παρεμβάσεις. Οι ανασκοπήσεις για την παραγωγική ΤΝ στην αρχιτεκτονική επισημαίνουν ότι τα συστήματα αυτά πρέπει να ενισχύουν τη σχεδιαστική σύνθεση και την ανθρώπινη κρίση και όχι να περιορίζονται στην αυτοματοποίηση μεμονωμένων εργασιών χωρίς σύνδεση με τις συνολικές απαιτήσεις του έργου (Khan et al., 2025).

3.5.3 Παραγωγή προκαταρκτικών σχεδιαστικών σεναρίων

Η χρήση των LLMs για την παραγωγή σχεδιαστικών σεναρίων πρέπει να διακρίνεται από τον παραγωγικό σχεδιασμό που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στον υπολογιστικό παραγωγικό σχεδιασμό, η γεωμετρία παραμετροποιείται, οι εναλλακτικές αξιολογούνται μέσω προσομοιώσεων και η αναζήτηση λύσεων πραγματοποιείται με αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Οι προτάσεις συνδέονται, επομένως, με μετρήσιμους δείκτες ενεργειακής, θερμικής, οπτικής ή οικονομικής απόδοσης.

Αντίθετα, ένα γενικής χρήσης LLM παράγει κυρίως λεκτικές ή πολυτροπικές απαντήσεις βάσει της οδηγίας του χρήστη, του περιεχομένου της συνομιλίας και των αρχείων που του παρέχονται. Δεν εκτελεί αυτομάτως ενεργειακή προσομοίωση, δεν υπολογίζει τη γεωμετρία ενός σκιάστρου, δεν παράγει λύσεις Pareto και δεν επαληθεύει την κατασκευασσιμότητα μιας παρέμβασης. Μπορεί να αξιοποιήσει γενικές αρχές σχεδιασμού και να τις συσχετίσει με το περιγραφόμενο πρόβλημα, αλλά η τεχνική εγκυρότητα των προτάσεων πρέπει να επιβεβαιώνεται ανεξάρτητα.

Στο επίπεδο της προκαταρκτικής αρχιτεκτονικής διερεύνησης μπορούν να διακριθούν τρεις λειτουργίες. Η πρώτη αφορά την παραγωγή ιδεών. Το μοντέλο μπορεί να προτείνει πιθανές κατευθύνσεις, όπως εξωτερική σκίαση, βελτίωση του φυσικού αερισμού, επισκευή κουφωμάτων, περιορισμένη φύτευση ή αναδιοργάνωση τεχνικού εξοπλισμού. Στη φάση αυτή η συνεισφορά του είναι κυρίως διερευνητική, καθώς βοηθά να διευρυνθεί ο κατάλογος των εναλλακτικών που μπορούν να εξεταστούν.

Η δεύτερη λειτουργία αφορά την προκαταρκτική αιτιολόγηση και οργάνωση των προτάσεων. Το LLM μπορεί να συνδέσει μια παρέμβαση με το πρόβλημα που επιχειρεί να αντιμετωπίσει, να περιγράψει το αναμενόμενο όφελος, να αναφέρει βασικές προϋποθέσεις και να διακρίνει ανάμεσα σε ήπιες και περισσότερο εκτεταμένες λύσεις. Μπορεί επίσης να προτείνει μια αρχική σειρά προτεραιότητας, για παράδειγμα να προηγηθεί η επιθεώρηση και συντήρηση ενός υφιστάμενου στοιχείου πριν από την πλήρη αντικατάστασή του.

Η τρίτη λειτουργία αφορά την αναγνώριση των ελλείψεων του διαθέσιμου υλικού. Ένα κατάλληλα καθοδηγούμενο μοντέλο μπορεί να επισημάνει ότι απαιτούνται αυτοψία, μετρήσεις θερμοκρασίας ή φωτισμού, καταγραφή της λειτουργίας των κουφωμάτων, έλεγχος των εγκαταστάσεων ή ειδική μελέτη για ένα νέο σκίαστρο. Η αναφορά των αναγκαίων επόμενων ελέγχων αποτελεί σημαντικό μέρος της χρησιμότητας των LLMs, επειδή μετατρέπει μια γενική πρόταση σε αφετηρία περισσότερο οργανωμένης τεχνικής διερεύνησης.

Οι παραπάνω λειτουργίες δεν πρέπει να συγχέονται με την τεχνική επαλήθευση. Χωρίς επαρκή δεδομένα και εξωτερικά υπολογιστικά εργαλεία, το μοντέλο δεν μπορεί να προσδιορίσει με αξιοπιστία την πραγματική εξοικονόμηση ενέργειας, τη μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας, την επάρκεια του φυσικού φωτισμού, την ακριβή συμπεριφορά του αερισμού, το κόστος της παρέμβασης ή τη συμμόρφωσή της με όλους τους ισχύοντες κανονισμούς. Η παραγωγή μιας τεχνικά διατυπωμένης απάντησης δεν αποτελεί απόδειξη ότι έχουν πραγματοποιηθεί οι αντίστοιχοι υπολογισμοί.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρέπει, συνεπώς, να εξετάζει διαφορετικά τη δημιουργικότητα και διαφορετικά την τεχνική επάρκεια. Μια πρόταση μπορεί να είναι ενδιαφέρουσα ως σχεδιαστική ιδέα, αλλά να μην είναι άμεσα εφαρμόσιμη. Αντίστροφα, μια περιορισμένη παρέμβαση συντήρησης μπορεί να παρουσιάζει μικρότερη πρωτοτυπία, αλλά μεγαλύτερη τεχνική ωριμότητα και ασφάλεια. Η βιβλιογραφία για την παραγωγική ΤΝ στην αρχιτεκτονική δείχνει ότι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι πολυδιάστατη και συχνά συνδυάζει συγκριτική εξέταση, ανθρώπινη κρίση και διαφορετικές ποιοτικές ή υπολογιστικές μετρικές, καθώς δεν υπάρχει μία μοναδική ορθή σχεδιαστική απάντηση (Jang et al., 2025).

3.5.4 Διατύπωση οδηγιών, αναπαραγωγιμότητα και έλεγχος αξιοπιστίας

Η ποιότητα μιας απάντησης από LLM εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη διατύπωση της οδηγίας, το περιεχόμενο της συνομιλίας και την ποιότητα των διαθέσιμων αρχείων. Μια αόριστη οδηγία μπορεί να οδηγήσει σε γενικές συστάσεις, ενώ μια περισσότερη δομημένη οδηγία μπορεί να κατευθύνει το μοντέλο προς συγκεκριμένο πρόβλημα, τύπο απάντησης και επίπεδο λεπτομέρειας. Για τον λόγο αυτό, η διατύπωση των οδηγιών δεν αποτελεί ουδέτερη ή δευτερεύουσα διαδικασία, αλλά μέρος της μεθοδολογίας χρήσης του εργαλείου.

Σε αρχιτεκτονικές και τεχνικές εφαρμογές, μια κατάλληλη οδηγία πρέπει να προσδιορίζει:

- το αντικείμενο και τα όρια της ανάλυσης,
- τα αρχεία και τις πληροφορίες που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν,
- τα ζητήματα που πρέπει να εξεταστούν,
- τον αριθμό και το επίπεδο των ζητούμενων εναλλακτικών,
- τον τρόπο παρουσίασης κάθε παρέμβασης,
- την ανάγκη διάκρισης μεταξύ τεκμηριωμένου στοιχείου και υπόθεσης,
- την υποχρέωση αναφοράς των δεδομένων ή των μελετών που λείπουν.

Η σαφής οριοθέτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν το μοντέλο εξετάζει ένα πραγματικό κτίριο. Χωρίς ρητή οδηγία, μπορεί να συμπληρώσει τα κενά με εύλογες αλλά μη επιβεβαιωμένες υποθέσεις, όπως η κατάσταση ενός δομικού στοιχείου, η ύπαρξη συγκεκριμένου εξοπλισμού ή η λειτουργία ενός ανοίγματος. Αντίθετα, όταν καλείται να διακρίνει ρητά ανάμεσα στα δεδομένα, στις εύλογες παραδοχές και στα σημεία που απαιτούν αυτοψία, η απάντηση γίνεται περισσότερο διαφανής και ελέγξιμη.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μοντέλων είναι αναγκαίο να χρησιμοποιείται κοινό πληροφοριακό πακέτο και κοινός κορμός οδηγιών. Η χρήση διαφορετικών σχεδίων, διαφορετικής σειράς αρχείων ή διαφορετικής λεπτομέρειας στις οδηγίες θα μπορούσε να επηρεάσει το αποτέλεσμα και να δυσχεράνει τη σύγκριση. Η κοινή εισροή δεν εξασφαλίζει απόλυτα ίδιες συνθήκες, αλλά περιορίζει έναν σημαντικό παράγοντα διαφοροποίησης και επιτρέπει η ανάλυση να επικεντρωθεί περισσότερο στον τρόπο απόκρισης των μοντέλων.

Παράλληλα, οι απαντήσεις των LLMs δεν είναι πλήρως ντετερμινιστικές. Η επανάληψη της ίδιας οδηγίας μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις στη διατύπωση, στην επιλογή των προτάσεων ή στην ιεράρχησή τους. Επιπλέον, οι εμπορικές εφαρμογές ανανεώνονται συχνά και μπορεί να μεταβάλλουν τα υποκείμενα μοντέλα, τις ρυθμίσεις ή τις δυνατότητες επεξεργασίας αρχείων. Για τον λόγο αυτό, η αναπαραγωγικότητα μιας έρευνας απαιτεί καταγραφή της ημερομηνίας χρήσης, της δηλωμένης έκδοσης, των πλήρων οδηγιών, της σειράς υποβολής των δεδομένων και των αυτούσιων απαντήσεων. Τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται ως απόδοση συγκεκριμένων συστημάτων υπό συγκεκριμένες συνθήκες και όχι ως μόνιμη ή καθολική κατάταξη των εφαρμογών (Bommasani et al., 2021; Zhao et al., 2023).

Η αξιοπιστία αποτελεί τον σημαντικότερο περιορισμό της χρήσης των LLMs σε τεχνικά ζητήματα. Τα μοντέλα μπορούν να παράγουν απαντήσεις που είναι γλωσσικά συνεκτικές και φαινομενικά τεκμηριωμένες, αλλά περιλαμβάνουν ανακριβείς πληροφορίες, ανύπαρκτες πηγές, αδικαιολόγητες βεβαιότητες ή παραλείψεις. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται συνήθως ως «παραίσθηση» (*hallucination*) και δεν περιορίζεται σε τυχαία σφάλματα, αλλά συνδέεται με τον τρόπο παραγωγής των απαντήσεων από τα μοντέλα (Huang et al., 2023; Tonmoy et al., 2024).

Η αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτεί πολλαπλά επίπεδα ελέγχου. Αρχικά, οι ισχυρισμοί πρέπει να διασταυρώνονται με τα αρχικά σχέδια, τις τεχνικές εκθέσεις, τις φωτογραφίες και τις λοιπές πηγές. Στη συνέχεια, οι υποθέσεις πρέπει να δηλώνονται ως τέτοιες και να μην παρουσιάζονται ως στοιχεία του κτιρίου. Οι προτάσεις που αφορούν υπολογισμούς, κανονισμούς, στατική επάρκεια, ενεργειακή συμπεριφορά ή ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις πρέπει να παραπέμπονται σε αρμόδιους επαγγελματίες και κατάλληλα εργαλεία ανάλυσης. Η σύνδεση των LLMs με αξιόπιστα αποθετήρια και δομημένα δεδομένα μπορεί να μειώσει ορισμένους κινδύνους, αλλά δεν καταργεί την ανάγκη ανθρώπινης εποπτείας.

Η διαδικασία κριτικού αυτοελέγχου, κατά την οποία το μοντέλο καλείται να εντοπίσει τις υποθέσεις, τις αδυναμίες και τις απαιτήσεις περαιτέρω διερεύνησης της δικής του απάντησης, μπορεί να συμβάλει στη διαφάνεια. Δεν αποτελεί, όμως, ανεξάρτητη επιβεβαίωση. Το ίδιο μοντέλο που παρήγαγε μια μη τεκμηριωμένη πληροφορία μπορεί να αποτύχει να την αναγνωρίσει ή να την επαναδιατυπώσει με εξίσου πειστικό τρόπο. Ο

αυτοέλεγχος πρέπει, επομένως, να θεωρείται συμπληρωματικό μέσο και όχι υποκατάστατο της εξωτερικής αξιολόγησης.

Στην παρούσα εργασία, το ChatGPT και το Gemini χρησιμοποιούνται ως πολυτροπικά και διαλογικά εργαλεία παραγωγικής ΤΝ για την επεξεργασία κοινού αρχιτεκτονικού, φωτογραφικού και τεχνικού υλικού και τη διαμόρφωση προκαταρκτικών σεναρίων βιοκλιματικής αναβάθμισης. Δεν χρησιμοποιούνται ως εργαλεία παραμετρικού παραγωγικού σχεδιασμού, ενεργειακής προσομοίωσης ή αυτόματης τεχνικής πιστοποίησης. Η αξιολόγησή τους αφορά τον τρόπο με τον οποίο οργανώνουν τις διαθέσιμες πληροφορίες, προτείνουν και ιεραρχούν παρεμβάσεις, προσαρμόζουν τις απαντήσεις τους στα χαρακτηριστικά του κτιρίου και αναγνωρίζουν τους περιορισμούς τους. Οι παραγόμενες προτάσεις αντιμετωπίζονται ως υποστηρικτικές σχεδιαστικές κατευθύνσεις, οι οποίες απαιτούν αυτοψία, μετρήσεις, προσομοιώσεις και έλεγχο από αρμόδιους επαγγελματίες πριν αποκτήσουν τεχνική ή εφαρμοστική ισχύ.

4. Ηθικές, νομικές και κοινωνικές διαστάσεις της ΤΝ στην αρχιτεκτονική και στις κατασκευές

4.1 Πλαίσιο «υπεύθυνης» ή «αξιόπιστης» Τεχνητής Νοημοσύνης

Η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην αρχιτεκτονική και στις κατασκευές δεν μπορεί να εξετάζεται αποκλειστικά ως τεχνικό ζήτημα ή ως μέσο αύξησης της αποδοτικότητας. Τα συστήματα ΤΝ μπορούν να υποστηρίξουν την επεξεργασία πληροφοριών, τη διαμόρφωση εναλλακτικών σεναρίων και την προκαταρκτική αξιολόγηση σχεδιαστικών επιλογών. Ωστόσο, όταν οι προτάσεις τους αφορούν κτίρια και χώρους καθημερινής χρήσης, οι πιθανές συνέπειες δεν περιορίζονται στο ψηφιακό περιβάλλον, αλλά μπορούν να επηρεάσουν την ασφάλεια, την υγεία, την προσβασιμότητα, την περιβαλλοντική ποιότητα και την εμπειρία των χρηστών. Η χρήση της ΤΝ πρέπει, επομένως, να εντάσσεται σε ένα πλαίσιο ανθρώπινης εποπτείας, τεχνικής επαλήθευσης και σαφούς κατανομής ευθύνης.

Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, η έννοια της «αξιόπιστης ΤΝ» αναπτύχθηκε συστηματικά από την Ομάδα Εμπειρογνομόνων Υψηλού Επιπέδου για την Τεχνητή Νοημοσύνη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πλαίσιο, ένα σύστημα ΤΝ πρέπει να είναι νόμιμο, δηλαδή να συμμορφώνεται με το ισχύον δίκαιο, ηθικό, δηλαδή να σέβεται τις θεμελιώδεις αρχές και αξίες, και στιβαρό, ώστε να περιορίζονται οι τεχνικοί και κοινωνικοί κίνδυνοι κατά τη χρήση του (High-Level Expert Group on Artificial Intelligence [AI HLEG], 2019). Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, επειδή μια απάντηση που εμφανίζεται τεχνικά εύλογη ή καινοτόμος δεν είναι αναγκαστικά ασφαλής, εφαρμόσιμη, κοινωνικά κατάλληλη ή επαρκώς τεκμηριωμένη.

Η AI HLEG (2019) συνδέει την αξιόπιστη ΤΝ με τέσσερις βασικές ηθικές αρχές: τον σεβασμό της ανθρώπινης αυτονομίας, την πρόληψη της βλάβης, τη δικαιοσύνη και την εξηγησιμότητα. Στον αρχιτεκτονικό και κατασκευαστικό κλάδο, ο σεβασμός της ανθρώπινης αυτονομίας σημαίνει ότι το σύστημα ΤΝ δεν πρέπει να αντικαθιστά την επαγγελματική κρίση του αρχιτέκτονα, του μηχανικού ή του αρμόδιου φορέα. Η πρόληψη της βλάβης απαιτεί να μην υιοθετούνται προτάσεις που μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ασφάλειας, υγείας, λειτουργικότητας ή προσβασιμότητας. Η δικαιοσύνη αφορά την αποφυγή λύσεων που αναπαράγουν αποκλεισμούς ή αγνοούν τις ανάγκες

διαφορετικών ομάδων χρηστών. Η εξηγησιμότητα, τέλος, προϋποθέτει ότι πρέπει να είναι σαφές ποια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν, ποιες παραδοχές έγιναν και με ποια κριτήρια αξιολογείται μια πρόταση.

Οι αρχές αυτές εξειδικεύονται σε επτά απαιτήσεις: ανθρώπινη δράση και εποπτεία, τεχνική στιβαρότητα και ασφάλεια, ιδιωτικότητα και διακυβέρνηση δεδομένων, διαφάνεια, ποικιλομορφία και μη διάκριση, κοινωνική και περιβαλλοντική ευημερία και λογοδοσία (AI HLEG, 2019). Οι απαιτήσεις αυτές δεν αποτελούν απλώς γενικές διακηρύξεις, αλλά μπορούν να μετατραπούν σε πρακτικές ερωτήσεις κατά τη χρήση ενός εργαλείου TN. Εξετάζεται, για παράδειγμα, αν το μοντέλο βασίζεται στο διαθέσιμο υλικό ή εισάγει μη τεκμηριωμένες πληροφορίες, αν διακρίνει τα δεδομένα από τις υποθέσεις, αν αναγνωρίζει την ανάγκη πρόσθετων μετρήσεων και αν οι προτάσεις του μπορούν να ελεγχθούν από αρμόδιους επαγγελματίες.

Η βιβλιογραφία για την ηθική της TN παρουσιάζει σημαντική σύγκλιση γύρω από έννοιες όπως η διαφάνεια, η δικαιοσύνη, η μη πρόκληση βλάβης, η ιδιωτικότητα και η λογοδοσία (Jobin et al., 2019). Ωστόσο, η διατύπωση αρχών δεν εξασφαλίζει από μόνη της την υπεύθυνη εφαρμογή τους. Ο Mittelstadt (2019) επισημαίνει ότι οι γενικές ηθικές κατευθύνσεις πρέπει να συνοδεύονται από συγκεκριμένους μηχανισμούς εφαρμογής, επαγγελματικές αρμοδιότητες και διαδικασίες ελέγχου. Στον δομημένο χώρο, αυτό σημαίνει ότι πρέπει να καταγράφονται το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε, τα δεδομένα που του δόθηκαν, οι οδηγίες που διατυπώθηκαν, οι παραδοχές που ενσωματώθηκαν στην απάντηση και οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν πριν από την αποδοχή ή την απόρριψη μιας πρότασης.

Αντίστοιχα, το πλαίσιο διαχείρισης κινδύνων του Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων και Τεχνολογίας των Ηνωμένων Πολιτειών οργανώνει την αξιόπιστη χρήση της TN γύρω από τη διακυβέρνηση, τη χαρτογράφηση, τη μέτρηση και τη διαχείριση των κινδύνων. Η αξιοπιστία δεν αξιολογείται μόνο από την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος, αλλά και από την εγκυρότητα των δεδομένων, την ασφάλεια, την ανθεκτικότητα, τη διαφάνεια, την εξηγησιμότητα, την προστασία της ιδιωτικότητας και τη διαχείριση των προκαταλήψεων (National Institute of Standards and Technology [NIST], 2023). Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι κατάλληλη για την αρχιτεκτονική, επειδή αντιμετωπίζει τον κίνδυνο ως ζήτημα ολόκληρης της διαδικασίας και όχι μόνο ως πιθανό σφάλμα της τελικής απάντησης.

Στο ευρωπαϊκό θεσμικό περιβάλλον, ο Κανονισμός 2024/1689 για την Τεχνητή Νοημοσύνη υιοθετεί επίσης μια προσέγγιση βασισμένη στον κίνδυνο και επιδιώκει την ανάπτυξη και χρήση ανθρωποκεντρικών και αξιόπιστων συστημάτων ΤΝ, με παράλληλη προστασία της υγείας, της ασφάλειας και των θεμελιωδών δικαιωμάτων (European Parliament & Council of the European Union, 2024). Δεν έχουν όλες οι χρήσεις ΤΝ την ίδια επικινδυνότητα. Ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για αρχική διερεύνηση ιδεών ή οργάνωση πληροφοριών δεν έχει την ίδια βαρύτητα με ένα σύστημα που λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις για την ασφάλεια, την πρόσβαση ή τη λειτουργία ενός κτιρίου. Παρ' όλα αυτά, ακόμη και η προκαταρκτική χρήση απαιτεί σαφή όρια, επειδή μια πρόταση μπορεί να επηρεάσει μεταγενέστερες αποφάσεις, εάν γίνει αποδεκτή χωρίς κατάλληλο έλεγχο.

Η ανθρώπινη εποπτεία αποτελεί, επομένως, κεντρική προϋπόθεση της υπεύθυνης χρήσης της ΤΝ. Ο άνθρωπος δεν πρέπει να λειτουργεί ως παθητικός αποδέκτης μιας τεχνολογικά διατυπωμένης πρότασης, αλλά ως υπεύθυνος αξιολογητής της. Οφείλει να εξετάζει την ακρίβεια των δεδομένων, να εντοπίζει μη τεκμηριωμένες υποθέσεις, να ελέγχει τη συμβατότητα με τις πραγματικές συνθήκες του κτιρίου και να ζητά τις αναγκαίες αυτοψίες, μετρήσεις, προσομοιώσεις ή εξειδικευμένες μελέτες. Η τελική τεχνική, αρχιτεκτονική και επαγγελματική ευθύνη δεν μεταβιβάζεται στο σύστημα ΤΝ.

Η απαίτηση αυξημένης προσοχής είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν οι αποφάσεις αφορούν σχολικούς χώρους. Τα παιδιά μπορεί να επηρεάζονται από συστήματα ΤΝ ακόμη και όταν δεν αλληλεπιδρούν άμεσα με αυτά, εφόσον τα συστήματα υποστηρίζουν αποφάσεις για το περιβάλλον, την υγεία, την εκπαίδευση ή την ασφάλειά τους (UNICEF, 2021b). Αυτό δεν σημαίνει ότι κάθε χρήση ΤΝ σε ένα σχολικό έργο αποτελεί αυτομάτως εφαρμογή υψηλού κινδύνου. Σημαίνει, όμως, ότι η αξιολόγηση των προτάσεων πρέπει να λαμβάνει υπόψη το βέλτιστο συμφέρον των παιδιών και να μην περιορίζεται αποκλειστικά στην ενεργειακή ή τεχνική απόδοση.

Στην παρούσα εργασία, το ChatGPT και το Gemini χρησιμοποιούνται για την οργάνωση του διαθέσιμου αρχιτεκτονικού, φωτογραφικού και τεχνικού υλικού και για την παραγωγή προκαταρκτικών σεναρίων βιοκλιματικής αναβάθμισης της νότιας ζώνης του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου. Η αξιολόγησή τους επικεντρώνεται στο κατά πόσο αξιοποιούν ορθά το υλικό, διαμορφώνουν βιοκλιματικά εύλογες και προκαταρκτικά εφαρμόσιμες προτάσεις, σέβονται την αρχιτεκτονική φυσιογνωμία του

κτιρίου και αναγνωρίζουν τις ελλείψεις των διαθέσιμων δεδομένων. Οι προτάσεις τους δεν αποκτούν εφαρμοστική ισχύ χωρίς ανεξάρτητη ανθρώπινη και τεχνική επαλήθευση.

4.2 Ηθικά ζητήματα από την ενσωμάτωση της TN στον κλάδο AEC

Η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κλάδο της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και των κατασκευών αποκτά ιδιαίτερη ηθική σημασία, επειδή τα αποτελέσματά της μπορούν να επηρεάσουν αποφάσεις με μακροχρόνιες και υλικές συνέπειες. Μια πρόταση σχεδιασμού δεν παραμένει στο επίπεδο της ψηφιακής πληροφορίας, αλλά μπορεί να μετατραπεί σε κτιριακό στοιχείο, τεχνικό σύστημα, υπαίθριο χώρο ή διαδικασία λειτουργίας και συντήρησης. Επομένως, η αξιολόγηση της TN στον κλάδο AEC δεν μπορεί να περιορίζεται στην ταχύτητα ή στην παραγωγικότητα. Πρέπει να εξετάζει επίσης την αξιοπιστία, τη διαφάνεια, την ασφάλεια, την προστασία των δεδομένων, την κοινωνική καταλληλότητα και την κατανομή της ευθύνης.

Ένα πρώτο ζήτημα αφορά τη μεταβολή των επαγγελματικών ρόλων. Τα εργαλεία TN μπορούν να αναλάβουν ή να επιταχύνουν εργασίες όπως η οργάνωση τεχνικών πληροφοριών, η παραγωγή εναλλακτικών προτάσεων, η ταξινόμηση κινδύνων, η σύνταξη κειμένων και η προκαταρκτική σύγκριση σεναρίων. Η εξέλιξη αυτή δεν συνεπάγεται αναγκαστικά την αντικατάσταση του αρχιτέκτονα ή του μηχανικού, αλλά μεταβάλλει το περιεχόμενο της επαγγελματικής εργασίας. Ο επαγγελματίας καλείται να λειτουργεί όχι μόνο ως δημιουργός ή αναλυτής, αλλά και ως κριτικός αξιολογητής των αποτελεσμάτων της TN. Το ηθικό πρόβλημα εμφανίζεται όταν η ευχέρεια και η ταχύτητα του εργαλείου οδηγούν σε υποβάθμιση της ανθρώπινης κρίσης ή σε αποδοχή προτάσεων χωρίς επαρκή έλεγχο.

Η χρήση της TN μπορεί επίσης να περιορίσει τη δημιουργική αυτονομία, εάν τα παραγόμενα αποτελέσματα αντιμετωπίζονται ως αντικειμενικές ή προνομιακές λύσεις. Τα μοντέλα βασίζονται σε δεδομένα, παραδείγματα και πρότυπα που έχουν ήδη παραχθεί. Επομένως, υπάρχει κίνδυνος να αναπαράγουν κυρίαρχες σχεδιαστικές λογικές, να περιορίζουν την ποικιλία των προσεγγίσεων ή να ευνοούν λύσεις που ανταποκρίνονται ευκολότερα σε μετρήσιμα κριτήρια. Η ενεργειακή απόδοση, το κόστος, οι επιφάνειες και οι λειτουργικές σχέσεις μπορούν να αποτυπωθούν σχετικά εύκολα, ενώ η πολιτισμική ταυτότητα, η κοινωνική ένταξη, η αίσθηση ασφάλειας και η ποιότητα της εμπειρίας είναι

δυσκολότερο να ενσωματωθούν σε ένα αυτοματοποιημένο πλαίσιο αξιολόγησης (Netser et al., 2025).

Η δυσκολία αυτή συνδέεται με το ζήτημα της αλγοριθμικής μεροληψίας. Τα συστήματα TN μπορούν να αναπαράγουν περιορισμούς και ανισότητες που υπάρχουν στα δεδομένα εκπαίδευσης ή στις παραδοχές με τις οποίες χρησιμοποιούνται. Στην αρχιτεκτονική, η μεροληψία δεν εμφανίζεται πάντοτε ως άμεση διάκριση. Μπορεί να εκδηλωθεί μέσω της παραγωγής χώρων που εξυπηρετούν έναν υποθετικό «μέσο χρήστη» και δεν λαμβάνουν επαρκώς υπόψη άτομα με διαφορετικές κινητικές, αισθητηριακές, κοινωνικές ή παιδαγωγικές ανάγκες. Στα σχολικά περιβάλλοντα, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προτάσεις που φαίνονται τεχνικά λειτουργικές αλλά δεν είναι εξίσου προσβάσιμες, ασφαλείς ή κατάλληλες για όλους τους μαθητές.

Η αντιμετώπιση της μεροληψίας δεν μπορεί να βασίζεται μόνο στην τεχνική βελτίωση των δεδομένων. Χρειάζεται να εξετάζεται ποιος ορίζει το πρόβλημα, ποια κριτήρια επιλέγονται, ποιοι χρήστες εκπροσωπούνται και ποιες ανάγκες παραμένουν εκτός της ανάλυσης. Η διεθνής συζήτηση για την ηθική της TN συγκλίνει γύρω από αρχές όπως η δικαιοσύνη, η μη διάκριση, η διαφάνεια και η λογοδοσία, αλλά η εφαρμογή τους εξαρτάται από το συγκεκριμένο κοινωνικό και επαγγελματικό πλαίσιο (Jobin et al., 2019). Για παράδειγμα, η δικαιοσύνη στον σχεδιασμό ενός σχολικού χώρου δεν αφορά μόνο την ορθότητα ενός αλγορίθμου. Αφορά και το κατά πόσο οι διαθέσιμοι χώροι, η σκίαση, η πρόσβαση και οι δυνατότητες χρήσης κατανέμονται με τρόπο που δεν αποκλείει συγκεκριμένες ομάδες μαθητών.

Ένα δεύτερο σημαντικό πεδίο αφορά την προστασία και τη διακυβέρνηση των δεδομένων. Οι εφαρμογές TN στον κλάδο AEC μπορεί να επεξεργάζονται σχέδια, φωτογραφίες, μοντέλα BIM, τεχνικές εκθέσεις, στοιχεία ενεργειακής κατανάλωσης και δεδομένα από αισθητήρες ή συστήματα διαχείρισης κτιρίων. Τα αρχεία αυτά δεν περιέχουν πάντοτε προσωπικά δεδομένα, αλλά μπορεί να περιλαμβάνουν εμπιστευτικές πληροφορίες για τη μορφή, τη λειτουργία, τις εγκαταστάσεις, τα σημεία πρόσβασης ή τα συστήματα ασφαλείας ενός κτιρίου. Επομένως, η υπεύθυνη χρήση τους απαιτεί έλεγχο όχι μόνο της ιδιωτικότητας, αλλά και της εμπιστευτικότητας και της ασφάλειας της τεχνικής πληροφορίας.

Η διάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν τα αρχεία υποβάλλονται σε εμπορικές πλατφόρμες παραγωγικής TN. Πριν από την υποβολή πρέπει να εξετάζεται αν ο χρήστης έχει το δικαίωμα να χρησιμοποιήσει και να αναπαράγει το υλικό, αν οι φωτογραφίες

περιλαμβάνουν αναγνωρίσιμα πρόσωπα ή άλλα προσωπικά στοιχεία και αν τα σχέδια περιέχουν πληροφορίες που δεν είναι αναγκαίες για τον σκοπό της ανάλυσης. Η αρχή της ελαχιστοποίησης επιβάλλει να υποβάλλονται μόνο τα δεδομένα που είναι απαραίτητα, αφού προηγηθεί αφαίρεση προσωπικών, εμπιστευτικών ή άσχετων πληροφοριών. Πρέπει επίσης να εξετάζονται οι ρυθμίσεις απορρήτου, η πολιτική διατήρησης των αρχείων και οι όροι χρήσης της εκάστοτε πλατφόρμας.

Στα σχολικά περιβάλλοντα, η διαχείριση των δεδομένων απαιτεί αυξημένη προσοχή, επειδή μπορεί να εμπλέκονται άμεσα ή έμμεσα πληροφορίες σχετικές με ανηλίκους. Ωστόσο, η αξιολόγηση ενός σχολικού κτιρίου δεν απαιτεί πάντοτε προσωπικά δεδομένα. Ο προσανατολισμός, η μορφή των ανοιγμάτων, οι επιφάνειες, τα υλικά, τα στοιχεία σκίασης και οι γενικές κλιματικές συνθήκες μπορούν να εξεταστούν χωρίς καταγραφή της ταυτότητας ή της συμπεριφοράς συγκεκριμένων μαθητών. Η επιλογή μη προσωπικών δεδομένων, όπου αυτά επαρκούν για τον ερευνητικό σκοπό, περιορίζει σημαντικά τους κινδύνους ιδιωτικότητας.

Ένα τρίτο ηθικό ζήτημα αφορά τη διαφάνεια και την εξηγησιμότητα. Στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, δεν αρκεί ένα σύστημα να παράγει μια φαινομενικά κατάλληλη λύση. Πρέπει να είναι δυνατό να εξεταστεί ποια στοιχεία του προβλήματος χρησιμοποίησε, ποιες υποθέσεις εισήγαγε και ποια κριτήρια έλαβε υπόψη. Η απαίτηση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν τα εργαλεία ΤΝ καλούνται να επεξεργαστούν ελλίπες ή ανομοιογενές υλικό. Μια πρόταση μπορεί να βασίζεται σε πραγματικό στοιχείο του σχεδίου, σε εύλογη τεχνική εκτίμηση ή σε μη τεκμηριωμένη υπόθεση. Εάν οι κατηγορίες αυτές δεν διακρίνονται, η απάντηση μπορεί να εμφανίζει αδικαιολόγητο βαθμό βεβαιότητας.

Η διαφάνεια συνδέεται άμεσα με τη λογοδοσία. Όταν μια πρόταση ΤΝ χρησιμοποιείται σε επαγγελματική διαδικασία, πρέπει να είναι σαφές ποιος την αξιολόγησε, ποιοι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν και για ποιον λόγο έγινε αποδεκτή ή απορρίφθηκε. Η ευθύνη δεν μπορεί να μεταφερθεί στο ίδιο το εργαλείο. Ο πάροχος της εφαρμογής, ο επαγγελματίας που τη χρησιμοποιεί, ο φορέας του έργου και οι αρμόδιοι μελετητές μπορεί να έχουν διαφορετικούς ρόλους, αλλά η τελική ενσωμάτωση μιας πρότασης απαιτεί ανθρώπινη απόφαση. Όπως επισημαίνει ο Mittelstadt (2019), οι γενικές αρχές της ηθικής ΤΝ δεν είναι επαρκείς όταν δεν συνοδεύονται από συγκεκριμένους μηχανισμούς ευθύνης και εφαρμογής.

Ένα τέταρτο ζήτημα αφορά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να παράγουν τεχνικά διατυπωμένες και ιδιαίτερα πειστικές απαντήσεις,

χωρίς αυτό να σημαίνει ότι οι πληροφορίες τους είναι ακριβείς ή ότι οι προτάσεις τους είναι εφαρμόσιμες. Η μελέτη του Aladağ (2023) σχετικά με τη χρήση του ChatGPT στη διαχείριση κινδύνων κατασκευαστικών έργων δείχνει ότι η απόδοση του εργαλείου διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της εργασίας και δεν δικαιολογεί την αντιμετώπισή του ως αυτοτελούς πηγής τεχνικής εγκυρότητας. Η γλωσσική συνοχή, επομένως, δεν πρέπει να συγχέεται με την τεχνική επάρκεια.

Για τον περιορισμό αυτού του κινδύνου απαιτείται διασταύρωση των απαντήσεων με τα αρχικά σχέδια, τις τεχνικές εκθέσεις, τις φωτογραφίες και τις διαθέσιμες επιστημονικές ή κανονιστικές πηγές. Οι προτάσεις που σχετίζονται με ενεργειακή συμπεριφορά, στατική επάρκεια, πυρασφάλεια, προσβασιμότητα ή ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις χρειάζονται έλεγχο με κατάλληλες μετρήσεις, υπολογισμούς και εξειδικευμένες μελέτες. Η ΤΝ μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων και επόμενων βημάτων, αλλά δεν μπορεί να πιστοποιήσει ότι μια λύση είναι ασφαλής ή σύμφωνη με τις απαιτήσεις του έργου.

Η ηθική αξιολόγηση της ΤΝ περιλαμβάνει επίσης την περιβαλλοντική διάσταση της ίδιας της τεχνολογίας. Η ανάπτυξη και λειτουργία μεγάλων μοντέλων απαιτεί υπολογιστική ισχύ, κέντρα δεδομένων, ηλεκτρική ενέργεια, υλικές υποδομές και συστήματα ψύξης. Επομένως, η χρήση ΤΝ για την υποστήριξη βιώσιμων αποφάσεων δεν είναι περιβαλλοντικά ουδέτερη. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας δεν πραγματοποιείται ποσοτική εκτίμηση του αποτυπώματος των δύο εφαρμογών, αλλά αναγνωρίζεται ότι η αξιολόγηση της τεχνολογίας πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τα πιθανά οφέλη για το κτίριο, αλλά και τις επιπτώσεις των ψηφιακών υποδομών που απαιτούνται για τη λειτουργία της.

4.3 Νομικές και δεοντολογικές διαστάσεις στη λήψη αποφάσεων για κτίρια

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην αρχιτεκτονική και στις κατασκευές δημιουργεί νομικά και δεοντολογικά ζητήματα, επειδή οι παραγόμενες προτάσεις μπορεί να επηρεάσουν την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα, την προσβασιμότητα, το κόστος και την περιβαλλοντική συμπεριφορά ενός κτιρίου. Ακόμη και όταν ένα σύστημα ΤΝ δεν λαμβάνει την τελική απόφαση, μπορεί να επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο ο μελετητής αντιλαμβάνεται το πρόβλημα, ιεραρχεί τις ανάγκες και επιλέγει τις λύσεις που θα

εξεταστούν. Για τον λόγο αυτό, η χρήση του πρέπει να εντάσσεται στο ισχύον θεσμικό πλαίσιο και στις δεοντολογικές υποχρεώσεις των επαγγελματιών.

Η βασική ευρωπαϊκή νομοθετική εξέλιξη είναι ο Κανονισμός (ΕΕ) 2024/1689 για την Τεχνητή Νοημοσύνη, γνωστός ως *AI Act*. Ο Κανονισμός υιοθετεί προσέγγιση βασισμένη στον κίνδυνο και δεν αντιμετωπίζει όλες τις εφαρμογές ΤΝ με τον ίδιο τρόπο. Η νομική αξιολόγηση εξαρτάται από τον προβλεπόμενο σκοπό του συστήματος, τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται και τη σοβαρότητα των πιθανών συνεπειών του (European Parliament & Council of the European Union, 2024). Ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την αρχική οργάνωση πληροφοριών και την παραγωγή μη δεσμευτικών σχεδιαστικών ιδεών δεν έχει το ίδιο νομικό βάρος με ένα σύστημα που ελέγχει αυτόματα την πρόσβαση, τον αερισμό, την ασφάλεια ή άλλες κρίσιμες λειτουργίες ενός κτιρίου.

Η χρήση του ChatGPT και του Gemini στην παρούσα εργασία δεν αποτελεί αυτομάτως εφαρμογή υψηλού κινδύνου με τη στενή έννοια του *AI Act*. Τα δύο εργαλεία δεν λαμβάνουν δεσμευτικές αποφάσεις, δεν ελέγχουν τη λειτουργία του σχολείου και δεν αξιολογούν μεμονωμένους μαθητές ή εκπαιδευτικούς. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή προκαταρκτικών σεναρίων, τα οποία υποβάλλονται σε ανθρώπινο έλεγχο. Η διαπίστωση αυτή δεν εξαλείφει την ανάγκη προσοχής. Μια μη τεκμηριωμένη ή τεχνικά ακατάλληλη πρόταση μπορεί να επηρεάσει μεταγενέστερες αποφάσεις, εάν αντιμετωπιστεί ως αξιόπιστη μόνο λόγω της γλωσσικής της πειστικότητας.

Σημαντική είναι επίσης η διάκριση ανάμεσα στους διαφορετικούς ρόλους που αναγνωρίζει το θεσμικό πλαίσιο. Άλλες υποχρεώσεις έχει ο πάροχος του μοντέλου ή της εφαρμογής και άλλες ο φορέας που χρησιμοποιεί το σύστημα μέσα σε μια επαγγελματική ή ερευνητική διαδικασία. Στην παρούσα περίπτωση, η ερευνήτρια λειτουργεί ως χρήστης εμπορικών εφαρμογών και δεν αναπτύσσει ούτε διαθέτει το υποκείμενο μοντέλο. Η δική της ευθύνη αφορά κυρίως την επιλογή των δεδομένων που υποβάλλονται, τη σαφή διατύπωση του σκοπού, την καταγραφή της διαδικασίας, την κριτική αξιολόγηση των απαντήσεων και την αποφυγή παρουσίασης των αποτελεσμάτων ως τεχνικά πιστοποιημένων λύσεων.

Με την υπεύθυνη χρήση συνδέεται και η έννοια της επαρκούς γνώσης της ΤΝ. Το άρθρο 4 του *AI Act* προβλέπει ότι οι πάροχοι και οι φορείς εφαρμογής πρέπει να λαμβάνουν μέτρα ώστε τα πρόσωπα που χειρίζονται συστήματα ΤΝ να διαθέτουν κατάλληλο επίπεδο γνώσεων, ανάλογα με τον ρόλο, την εμπειρία και το πλαίσιο χρήσης τους. Η απαίτηση αυτή δεν σημαίνει ότι κάθε αρχιτέκτονας ή ερευνητής πρέπει να διαθέτει εξειδίκευση

στην ανάπτυξη αλγορίθμων. Πρέπει, όμως, να κατανοεί τις βασικές δυνατότητες και αδυναμίες του εργαλείου, τον κίνδυνο ανακριβών απαντήσεων και τις περιπτώσεις στις οποίες απαιτούνται μετρήσεις, προσομοιώσεις ή έλεγχος από εξειδικευμένο επαγγελματία. Οι σχετικές υποχρεώσεις παιδείας για την ΤΝ εφαρμόζονται από τον Φεβρουάριο του 2025.

Η νομική και δεοντολογική αξιολόγηση αφορά επίσης τα δεδομένα που εισάγονται στα συστήματα. Ο Γενικός Κανονισμός Προστασίας Δεδομένων εφαρμόζεται όταν τα αρχεία περιλαμβάνουν πληροφορίες που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με αναγνωρίσιμα φυσικά πρόσωπα (European Union, 2016). Στα σχολικά περιβάλλοντα απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, επειδή ενδέχεται να εμφανίζονται μαθητές, εκπαιδευτικοί ή άλλα μέλη της σχολικής κοινότητας σε φωτογραφίες, έγγραφα και μεταδεδομένα. Πριν από την υποβολή αρχείων σε πλατφόρμες ΤΝ πρέπει, επομένως, να αφαιρούνται αναγνωρίσιμα πρόσωπα, ονόματα και άλλα μη αναγκαία προσωπικά στοιχεία.

Η αρχή της ελαχιστοποίησης των δεδομένων είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη συγκεκριμένη έρευνα. Η ανάλυση της νότιας ζώνης μπορεί να βασιστεί στον προσανατολισμό, στις όψεις, στα ανοίγματα, στις φωτογραφίες του κελύφους και στις τεχνικές περιγραφές, χωρίς να απαιτεί πληροφορίες για την ταυτότητα ή τη συμπεριφορά συγκεκριμένων μαθητών. Η χρήση μόνο των απολύτως αναγκαίων στοιχείων περιορίζει τον κίνδυνο παραβίασης της ιδιωτικότητας και ενισχύει τη δεοντολογική επάρκεια της διαδικασίας.

Πέρα από τα προσωπικά δεδομένα, τα αρχιτεκτονικά και τεχνικά αρχεία μπορεί να περιλαμβάνουν εμπιστευτικές ή ευαίσθητες πληροφορίες. Κατόψεις, όψεις και τεχνικές εκθέσεις μπορούν να αποτυπώνουν σημεία πρόσβασης, εγκαταστάσεις, υποδομές ασφαλείας ή άλλες λεπτομέρειες που δεν είναι απαραίτητες για τον ερευνητικό σκοπό. Πριν από την υποβολή τους σε εμπορική πλατφόρμα πρέπει να εξετάζεται ποιο μέρος του υλικού είναι πραγματικά αναγκαίο και αν μπορούν να αφαιρεθούν πληροφορίες που σχετίζονται με την ασφάλεια ή την εμπιστευτικότητα του κτιρίου.

Αντίστοιχα, πρέπει να εξετάζεται το δικαίωμα χρήσης και αναπαραγωγής του υλικού. Τα αρχιτεκτονικά σχέδια, οι φωτογραφίες και οι τεχνικές μελέτες ενδέχεται να προστατεύονται από δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας ή να έχουν παραχωρηθεί για συγκεκριμένο σκοπό. Η πρόσβαση σε ένα αρχείο δεν συνεπάγεται πάντοτε απεριόριστο δικαίωμα υποβολής του σε τρίτη πλατφόρμα. Η υπεύθυνη χρήση απαιτεί να ελέγχεται η

προέλευση του υλικού, οι άδειες που το συνοδεύουν και οι όροι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ερευνητικούς σκοπούς.

Επιπλέον, οι εμπορικές εφαρμογές TN λειτουργούν βάσει όρων χρήσης και πολιτικών απορρήτου που καθορίζουν τη διατήρηση, την επεξεργασία και την πιθανή αξιοποίηση των δεδομένων. Ο χρήστης πρέπει να ελέγχει τις διαθέσιμες ρυθμίσεις, να περιορίζει όπου είναι δυνατόν τη διατήρηση του ιστορικού και να αποφεύγει την υποβολή υλικού που δεν θα έπρεπε να γνωστοποιηθεί σε τρίτο φορέα. Οι πρακτικές αυτές δεν υποκαθιστούν μια πλήρη νομική αξιολόγηση, αλλά αποτελούν βασικά μέτρα υπεύθυνης διακυβέρνησης δεδομένων.

Η ανθρώπινη εποπτεία παραμένει καθοριστική και για την κατανομή της επαγγελματικής ευθύνης. Η χρήση TN δεν απαλλάσσει τον αρχιτέκτονα, τον μηχανικό ή τον φορέα του έργου από την υποχρέωση να εφαρμόζει τους ισχύοντες κανονισμούς, να ελέγχει την ασφάλεια και να τεκμηριώνει τις επιλογές του. Ένα μοντέλο γενικής χρήσης δεν διαθέτει επαγγελματική ιδιότητα, δεν υπογράφει μελέτες και δεν αναλαμβάνει την ευθύνη εφαρμογής των προτάσεών του. Η φράση «το πρότεινε η TN» δεν μπορεί να αποτελέσει επαρκή αιτιολόγηση για μια τεχνική απόφαση.

Για τον λόγο αυτό, η διαδικασία πρέπει να αφήνει σαφές ίχνος τεκμηρίωσης. Είναι αναγκαίο να καταγράφονται το εργαλείο και η έκδοση που χρησιμοποιήθηκαν, η ημερομηνία, τα αρχεία που υποβλήθηκαν, οι πλήρεις οδηγίες, οι απαντήσεις του μοντέλου και οι ανθρώπινες κρίσεις που οδήγησαν στην αποδοχή, τροποποίηση ή απόρριψη μιας πρότασης. Η τεκμηρίωση επιτρέπει να διαπιστωθεί ποιο μέρος μιας λύσης προήλθε από το διαθέσιμο υλικό, ποιο αποτέλεσε υπόθεση του μοντέλου και ποιο προέκυψε από μεταγενέστερη επαγγελματική αξιολόγηση.

Η νομική βαρύτητα της χρήσης εξαρτάται, τέλος, από το επίπεδο στο οποίο εντάσσεται η TN στη διαδικασία. Η προκαταρκτική παραγωγή ιδεών παρουσιάζει περιορισμένο και κυρίως έμμεσο κίνδυνο, εφόσον οι προτάσεις δεν εφαρμόζονται χωρίς έλεγχο. Αντίθετα, η χρήση TN σε αυτοματοποιημένο έλεγχο εγκαταστάσεων, πρόσβασης ή άλλων λειτουργιών μπορεί να έχει άμεσες συνέπειες για τους χρήστες και απαιτεί αυστηρότερες διαδικασίες ασφάλειας, παρακολούθησης και συμμόρφωσης. Η διάκριση αυτή αποτρέπει τόσο την υπερβολική νομική δραματοποίηση της προκαταρκτικής χρήσης όσο και την υποτίμηση των κινδύνων της.

4.4 Κοινωνική βιωσιμότητα, εκπαιδευτικά περιβάλλοντα και ΤΝ

Η κοινωνική βιωσιμότητα αποτελεί ουσιώδη διάσταση του σχεδιασμού σχολικών κτιρίων, καθώς αφορά τον τρόπο με τον οποίο ο χώρος επηρεάζει την υγεία, την ασφάλεια, την προσβασιμότητα, την ένταξη και την καθημερινή εμπειρία των χρηστών. Στα σχολικά περιβάλλοντα οι παράμετροι αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, επειδή οι βασικοί χρήστες είναι παιδιά και ο χώρος λειτουργεί ταυτόχρονα ως περιβάλλον μάθησης, κοινωνικοποίησης, ανάπτυξης και προστασίας. Επομένως, η αξιολόγηση μιας σχεδιαστικής πρότασης δεν μπορεί να περιορίζεται στην ενεργειακή απόδοση ή στην τεχνική εφαρμοσιμότητα, αλλά οφείλει να λαμβάνει υπόψη και τις πιθανές επιδράσεις της στους χρήστες.

Η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης μπορεί να υποστηρίξει τη διερεύνηση διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών, την οργάνωση τεχνικών πληροφοριών και την αναγνώριση πιθανών προβλημάτων. Παράλληλα, όμως, υπάρχει ο κίνδυνος να δοθεί προτεραιότητα σε παραμέτρους που περιγράφονται ή μετρούνται ευκολότερα, όπως η σκίαση, η ενεργειακή κατανάλωση, η έκταση μιας παρέμβασης ή ο αριθμός των ανοιγμάτων. Ποιοτικές διαστάσεις, όπως η αίσθηση ασφάλειας, η ευκολία χρήσης, η κοινωνική αλληλεπίδραση, η ψυχολογική άνεση και η καταλληλότητα του χώρου για διαφορετικές ανάγκες, δεν μπορούν πάντοτε να αποτυπωθούν μέσα από αρχιτεκτονικά σχέδια και τεχνικές περιγραφές.

Η περιβαλλοντική ποιότητα του σχολικού χώρου συνδέεται άμεσα με την κοινωνική του λειτουργία. Ο αερισμός, η θερμική άνεση, ο φυσικός φωτισμός και η ποιότητα του εσωτερικού αέρα δεν αποτελούν μόνο τεχνικούς δείκτες, αλλά παράγοντες που επηρεάζουν την άνεση, την υγεία και τις συνθήκες μάθησης των παιδιών (Toyinbo, 2023). Αντίστοιχα, στους υπαίθριους χώρους η σκίαση, η φύτευση, τα υλικά των επιφανειών και η προστασία από τη θερμική επιβάρυνση επηρεάζουν τη δυνατότητα ασφαλούς και ουσιαστικής χρήσης τους (Antoniadis et al., 2020). Η βιοκλιματική αναβάθμιση ενός σχολικού κτιρίου έχει, συνεπώς, και κοινωνική διάσταση, ακόμη και όταν η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως σε τεχνικά και αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά.

Η κοινωνική καταλληλότητα μιας πρότασης συνδέεται επίσης με την αρχή της συμπερίληψης. Ένας σχολικός χώρος δεν πρέπει να σχεδιάζεται αποκλειστικά με βάση τις ανάγκες ενός υποθετικού «μέσου» μαθητή. Πρέπει να εξετάζονται, μεταξύ άλλων, η

προσβασιμότητα, η ασφάλεια των διαδρομών, η ευκολία προσανατολισμού και η δυνατότητα χρήσης του χώρου από παιδιά με διαφορετικές κινητικές, αισθητηριακές ή άλλες ανάγκες. Τα εργαλεία ΤΝ μπορούν να υπενθυμίσουν τέτοιες παραμέτρους ή να προτείνουν εναλλακτικές λύσεις, αλλά δεν μπορούν από μόνα τους να εγγυηθούν ότι μια πρόταση είναι πράγματι συμπεριληπτική.

Η UNICEF (2021b) επισημαίνει ότι τα παιδιά μπορούν να επηρεάζονται από συστήματα ΤΝ ακόμη και όταν δεν αποτελούν τους άμεσους χρήστες τους, εφόσον τα συστήματα αυτά υποστηρίζουν αποφάσεις για την εκπαίδευση, την υγεία, την ασφάλεια ή το περιβάλλον τους. Η παρατήρηση αυτή εφαρμόζεται και στη χρήση της ΤΝ για τον σχεδιασμό σχολικών χώρων. Ακόμη και όταν το ChatGPT ή το Gemini χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από ενήλικες ερευνητές και μελετητές, οι σχεδιαστικές προτάσεις τους μπορεί να αφορούν χώρους που χρησιμοποιούνται καθημερινά από παιδιά. Η αξιολόγησή τους πρέπει, επομένως, να λαμβάνει υπόψη το βέλτιστο συμφέρον του παιδιού, την ασφάλεια, τη μη διάκριση και την προστασία της ευημερίας του.

Παράλληλα, η παιδοκεντρική προσέγγιση αναδεικνύει τη σημασία της συμμετοχής των χρηστών. Τα αρχιτεκτονικά σχέδια, οι φωτογραφίες και οι τεχνικές εκθέσεις μπορούν να αποτυπώσουν τη μορφή και ορισμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός σχολείου, αλλά δεν αποδίδουν πλήρως τον τρόπο με τον οποίο οι μαθητές και οι εκπαιδευτικοί βιώνουν και χρησιμοποιούν τον χώρο. Ζητήματα όπως η πραγματική λειτουργία των αιθουσών, η αίσθηση θερμικής ή οπτικής δυσφορίας, τα σημεία συγκέντρωσης και η ευκολία καθημερινής χρήσης απαιτούν παρατήρηση, συμμετοχικές διαδικασίες ή άμεση συλλογή δεδομένων από τη σχολική κοινότητα.

Η ανάγκη συμμετοχής δεν σημαίνει ότι κάθε προκαταρκτική διερεύνηση πρέπει να περιλαμβάνει εξαρχής πλήρη έρευνα χρηστών. Σημαίνει ότι οι προτάσεις που παράγονται χωρίς τέτοια δεδομένα πρέπει να παρουσιάζονται με σαφή αναγνώριση του περιορισμού τους. Τα σενάρια ΤΝ μπορούν να λειτουργήσουν ως αρχική βάση συζήτησης και όχι ως τελική απεικόνιση των αναγκών των χρηστών. Σε μια επόμενη φάση θα μπορούσαν να παρουσιαστούν σε εκπαιδευτικούς, μαθητές, γονείς και αρμόδιους τεχνικούς, ώστε να αξιολογηθούν ως προς την καθημερινή λειτουργία και την κοινωνική τους καταλληλότητα.

Η κοινωνική βιωσιμότητα συνδέεται ακόμη με τον κίνδυνο αλγοριθμικής μεροληψίας. Τα συστήματα ΤΝ παράγουν απαντήσεις με βάση πρότυπα που έχουν συναντήσει στα δεδομένα εκπαίδευσής τους και με βάση τις προτεραιότητες που καθορίζει ο χρήστης στις οδηγίες του. Εάν το ερώτημα επικεντρώνεται αποκλειστικά στην ενεργειακή απόδοση ή στη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης, το μοντέλο μπορεί να παραβλέψει κοινωνικές και παιδαγωγικές συνέπειες. Η δικαιοσύνη και η συμπερίληψη πρέπει, επομένως, να εισάγονται συνειδητά ως απαιτήσεις και να ελέγχονται από τον άνθρωπο, καθώς δεν προκύπτουν αυτομάτως από την τεχνική βελτιστοποίηση (Jobin et al., 2019).

Η United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2022) εντάσσει την ηθική της ΤΝ σε ένα ευρύτερο πλαίσιο ανθρώπινης αξιοπρέπειας, ανθρωπίνων δικαιωμάτων, κοινωνικής δικαιοσύνης, πολιτισμικής ποικιλομορφίας και περιβαλλοντικής προστασίας. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τα σχολικά περιβάλλοντα, επειδή αποτρέπει τη μετατροπή του σχεδιασμού σε άσκηση αποκλειστικά τεχνικής αποδοτικότητας. Μια πρόταση μπορεί να είναι βιοκλιματικά εύλογη, αλλά να απαιτεί υψηλή συντήρηση, να δυσχεραίνει την προσβασιμότητα ή να μην ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του σχολείου. Η κοινωνική αξιολόγηση πρέπει, συνεπώς, να συμπληρώνει την τεχνική και όχι να θεωρείται αυτόματο αποτέλεσμα της.

5. Μεθοδολογία της έρευνας

5.1 Ερευνητική προσέγγιση, σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα

Το ερευνητικό μέρος της παρούσας εργασίας υιοθετεί τη μορφή συγκριτικής μελέτης περίπτωσης με σχεδιαστικό προσανατολισμό. Η μελέτη περίπτωσης θεωρείται κατάλληλη όταν το υπό διερεύνηση ζήτημα εξετάζεται μέσα στο πραγματικό χωρικό, λειτουργικό και κοινωνικό του πλαίσιο και όταν τα όρια μεταξύ του φαινομένου και του περιβάλλοντος στο οποίο αυτό εκδηλώνεται δεν μπορούν να διαχωριστούν πλήρως. Στην αρχιτεκτονική έρευνα, η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει τον συνδυασμό διαφορετικών τύπων δεδομένων, όπως αρχιτεκτονικά σχέδια, τεχνικές περιγραφές, φωτογραφικό υλικό, κλιματικές πληροφορίες και επαγγελματικές εκτιμήσεις, προκειμένου να αναλυθεί ένα συγκεκριμένο σχεδιαστικό πρόβλημα και να διερευνηθούν εναλλακτικές δυνατότητες παρέμβασης (Groat & Wang, 2013).

Ως μελέτη περίπτωσης επιλέγεται το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο Αγρινίου, το οποίο αποτελεί τμήμα του ιστορικού συγκροτήματος των Παπαστρατειών Εκπαιδευτηρίων. Η επιλογή του συγκεκριμένου κτιρίου βασίζεται στην ιστορική και αρχιτεκτονική του σημασία, στη συνεχιζόμενη λειτουργία του ως εκπαιδευτικής μονάδας και, κυρίως, στη διαθεσιμότητα αρχιτεκτονικού και τεχνικού υλικού. Η μελέτη του Γκρίζη περιλαμβάνει αναλυτική παρουσίαση του συγκροτήματος, κατόψεις, όψεις, τομές, αξονομετρικές απεικονίσεις και έκθεση ελέγχου της κατάστασης του σχολείου (Γκρίζη, 2015). Οι διαθέσιμες κατόψεις αποτυπώνουν το υπόγειο, το ισόγειο, τον πρώτο όροφο και το δώμα, καθώς και τις βασικές χρήσεις των χώρων, ενώ το σχετικό αρχείο των όψεων παρουσιάζει διακριτά τη βόρεια, τη νότια, την ανατολική και τη δυτική πλευρά του κτιρίου.

Παρότι το θεωρητικό μέρος της εργασίας εξετάζει συνολικά τη βιωσιμότητα των σχολικών κτιρίων και των υπαίθριων εκπαιδευτικών χώρων, η εμπειρική έρευνα περιορίζεται σε ένα σαφέστερο και περισσότερο διαχειρίσιμο πεδίο. Ειδικότερα, επικεντρώνεται στη βιοκλιματική αναβάθμιση της νότιας ζώνης του σχολείου. Ως νότια ζώνη νοούνται η νότια όψη, οι αίθουσες που συνδέονται άμεσα με αυτήν και, στον βαθμό που το διαθέσιμο υλικό επιτρέπει ασφαλείς παρατηρήσεις, ο άμεσα συνδεδεμένος εξωτερικός χώρος. Η συγκεκριμένη οριοθέτηση δεν αναιρεί τον αρχικό προσανατολισμό της εργασίας προς τον βιώσιμο επανασχεδιασμό σχολικών υποδομών, αλλά τον

εξειδικεύει σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του κτιρίου, στο οποίο μπορούν να εξεταστούν ουσιαστικά οι δυνατότητες και οι περιορισμοί της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Η επιλογή της νότιας ζώνης συνδέεται άμεσα με βασικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Ο προσανατολισμός των ανοιγμάτων, ο έλεγχος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η κατάλληλη σκίαση, ο φυσικός φωτισμός και ο φυσικός αερισμός αποτελούν αλληλένδετες παραμέτρους της ενεργειακής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου (DeKay & Brown, 2014). Στα σχολικά κτίρια, οι παράμετροι αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι εσωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας, φωτισμού και ποιότητας αέρα επηρεάζουν την υγεία, την άνεση, τη συγκέντρωση και τη μαθησιακή εμπειρία των χρηστών (Toyinbo et al., 2023). Παράλληλα, οι στρατηγικές φυσικού αερισμού πρέπει να εξετάζονται σε συνδυασμό με τη θερμική άνεση και τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες, καθώς η ανεξέλεγκτη εισαγωγή εξωτερικού αέρα δεν αποτελεί πάντοτε επαρκή ή κατάλληλη λύση (Temprano et al., 2020).

Η εστίαση στη συγκεκριμένη ζώνη υποστηρίζεται και από τις καταγεγραμμένες συνθήκες του σχολείου. Σύμφωνα με την έκθεση ελέγχου, στα νότια ανοίγματα χρησιμοποιούνται κουρτίνες ως μέσο αντιηλιακής προστασίας. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η αρχική διαμόρφωση του αερισμού έχει υποστεί μεταβολές, καθώς οι εξωτερικές οπές αερισμού παραμένουν εμφανείς, αλλά έχουν κλειστεί εσωτερικά μετά την αποκατάσταση, ενώ στα υαλοστάσια έχουν τοποθετηθεί ανεμιστήρες (Γκρίζης, 2015). Τα στοιχεία αυτά δεν αρκούν για την εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων σχετικά με την πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά των αιθουσών, παρέχουν όμως ένα συγκεκριμένο υπόβαθρο για την προκαταρκτική διερεύνηση παρεμβάσεων σχετικών με την ηλιοπροστασία, τον αερισμό, τον φυσικό φωτισμό και τη θερινή θερμική άνεση.

Στην ερευνητική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δύο εφαρμογές παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης, το ChatGPT και το Gemini. Τα εργαλεία αυτά βασίζονται σε μεγάλα γλωσσικά μοντέλα, τα οποία έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας και σύνθεσης πληροφοριών σε φυσική γλώσσα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μεταξύ άλλων, για την οργάνωση τεχνικών δεδομένων, την παραγωγή εναλλακτικών ιδεών και την υποστήριξη προκαταρκτικών διαδικασιών λήψης αποφάσεων (Bommasani et al., 2021; Zhao et al., 2023).

Για να εξασφαλιστούν όσο το δυνατόν περισσότερες κοινές συνθήκες διερεύνησης, τα δύο εργαλεία έλαβαν το ίδιο αρχιτεκτονικό, τεχνικό και κλιματικό υλικό και θα κληθούν να απαντήσουν στα ίδια, προκαθορισμένα ερωτήματα. Η χρήση κοινού πληροφοριακού υποβάθρου αποσκοπεί στον περιορισμό των διαφορών που θα μπορούσαν να προκύψουν από άνιση ή διαφορετική πληροφόρηση. Οι απαντήσεις των δύο εφαρμογών εξετάστηκαν ως προς τον τρόπο με τον οποίο αναγνωρίζουν τα χαρακτηριστικά της υφιστάμενης κατάστασης, συνδέουν τις προτάσεις τους με τα αρχιτεκτονικά σχέδια, ιεραρχούν τις παρεμβάσεις και δηλώνουν τις τεχνικές προϋποθέσεις ή τις ελλείψεις δεδομένων.

Για να διατηρηθεί η σύνδεση της εμπειρικής έρευνας με την αρχική ιδέα της παραγωγής εναλλακτικών σχεδιαστικών σεναρίων, κάθε εργαλείο κλήθηκε να διαμορφώσει δύο διακριτές κατευθύνσεις παρέμβασης. Η πρώτη αφορούσε ένα σενάριο ελάχιστης και άμεσα εφαρμόσιμης παρέμβασης, ενώ η δεύτερη ένα σενάριο ολοκληρωμένης βιοκλιματικής αναβάθμισης. Η διάκριση αυτή επιτρέπει να εξεταστούν διαφορετικά επίπεδα έντασης, τεχνικής πολυπλοκότητας και έκτασης των προτεινόμενων λύσεων, χωρίς να απαιτείται από τα εργαλεία η εκπόνηση πλήρους αρχιτεκτονικής ή ενεργειακής μελέτης.

Το σενάριο ελάχιστης παρέμβασης προσανατολίστηκε σε ήπιες, περιορισμένες και κατά το δυνατόν αναστρέψιμες λύσεις, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς εκτεταμένη μεταβολή του κτιριακού κελύφους. Το σενάριο ολοκληρωμένης αναβάθμισης επέτρεψε περισσότερο σύνθετες προτάσεις, όπως η συνολικότερη αντιμετώπιση των κουφωμάτων και των υαλοστασίων, η αποκατάσταση ή αναδιαμόρφωση του συστήματος αερισμού, η προσθήκη εξωτερικών στοιχείων σκίασης και η αξιοποίηση του άμεσα συνδεδεμένου υπαίθριου χώρου. Σε κάθε περίπτωση, οι προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να συνεκτιμούν τον ιστορικό και μορφολογικό χαρακτήρα του κτιρίου.

5.2 Επιλογή και οριοθέτηση της μελέτης περίπτωσης

Στην αρχιτεκτονική έρευνα, η επιλογή μιας συγκεκριμένης περίπτωσης επιτρέπει τη σε βάθος εξέταση ενός πραγματικού και σύνθετου σχεδιαστικού ζητήματος μέσα στο ιδιαίτερο χωρικό, ιστορικό και λειτουργικό του πλαίσιο (Groat & Wang, 2013). Στην παρούσα εργασία, ως μελέτη περίπτωσης επιλέγεται το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο Αγρινίου και, ειδικότερα, η νότια ζώνη του κτιρίου.

Η επιλογή της συγκεκριμένης περίπτωσης βασίστηκε σε τέσσερα βασικά κριτήρια: στη συνάφεια του κτιρίου με το αντικείμενο της εργασίας, στην ιστορική και αρχιτεκτονική του σημασία, στη διαθεσιμότητα επαρκούς σχεδιαστικού και τεχνικού υλικού και στη δυνατότητα σαφούς οριοθέτησης ενός συγκεκριμένου πεδίου βιοκλιματικής παρέμβασης. Τα κριτήρια αυτά καθιστούν το σχολείο κατάλληλο για τη διερεύνηση της δυνατότητας των εργαλείων παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης να αξιοποιήσουν διαφορετικές μορφές αρχιτεκτονικής πληροφορίας και να διαμορφώσουν εναλλακτικά σενάρια επανασχεδιασμού.

5.2.1 Χαρακτηριστικά της επιλεγμένης μελέτης περίπτωσης

Τα Παπαστράτεια Εκπαιδευτήρια βρίσκονται στη νότια πλευρά του Πάρκου των Αδελφών Παπαστράτου, στο βόρειο τμήμα της πόλης του Αγρινίου. Το συγκρότημα αποτελείται από δύο συμμετρικά όμοια, διώροφα σχολικά κτίρια με υπόγειο και δώμα, τα οποία αρχικά προορίζονταν για τη στέγαση Δημοτικού και Γυμνασίου. Τα δύο κτίρια συνδέονται μεταξύ τους μέσω στεγασμένου χώρου, ενώ η κάτοψή τους αναπτύσσεται σε σχήμα Π, διαμορφώνοντας εσωτερικό υπαίθριο χώρο ανοικτό προς τον βορρά.

Η συγκεκριμένη μορφολογική και λειτουργική συγκρότηση προσφέρει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελέτη του φυσικού φωτισμού, του ηλιασμού και του αερισμού. Η διάταξη των περύγων, ο προσανατολισμός των όψεων, η επανάληψη των ανοιγμάτων και η σχέση των αιθουσών με τους διαδρόμους και τον υπαίθριο χώρο δεν αποτελούν μεμονωμένα στοιχεία, αλλά τμήματα μιας συνολικής αρχιτεκτονικής σύνθεσης. Κατά συνέπεια, οι προτεινόμενες παρεμβάσεις δεν μπορούν να αξιολογηθούν μόνο ως τεχνικές προσθήκες. Πρέπει να εξετάζονται και ως προς τον τρόπο με τον οποίο εντάσσονται στην υπάρχουσα μορφολογία και επηρεάζουν τη λειτουργία και την αναγνωρισιμότητα του ιστορικού σχολικού κτιρίου.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης είναι η διαθεσιμότητα αρχιτεκτονικών σχεδίων. Για το 5ο Δημοτικό Σχολείο περιλαμβάνονται κατόψεις του υπογείου, του ισόγειου, του πρώτου ορόφου και του δώματος, καθώς και όψεις. Οι κατόψεις που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα αποτυπώνουν επίσης τις βασικές χρήσεις των χώρων, μεταξύ των οποίων αίθουσες διδασκαλίας, διοικητικοί χώροι, αίθουσα εκδηλώσεων, αίθουσα Αγγλικών και εργαστήριο πληροφορικής. Η ύπαρξη των συγκεκριμένων πληροφοριών επιτρέπει στα δύο εργαλεία ΤΝ να συνδέσουν τις προτάσεις

τους με πραγματικούς χώρους και λειτουργίες, αντί να βασιστούν αποκλειστικά σε μια γενική λεκτική περιγραφή ενός σχολείου.

Παράλληλα, οι διαθέσιμες όψεις αποτυπώνουν χωριστά τη βόρεια, τη δυτική, τη νότια και την ανατολική πλευρά του κτιρίου. Η παρουσία προσανατολισμένων σχεδίων είναι απαραίτητη για τη μελέτη των βιοκλιματικών παραμέτρων, επειδή η αποτελεσματικότητα μιας παρέμβασης σκίασης ή φυσικού φωτισμού εξαρτάται άμεσα από τον προσανατολισμό, τη γεωμετρία των ανοιγμάτων και τη χρονική μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας (DeKay & Brown, 2014). Επομένως, η συγκεκριμένη περίπτωση επιτρέπει να εξεταστεί κατά πόσο το ChatGPT και το Gemini μπορούν να υπερβούν την παραγωγή γενικών συστάσεων και να διαφοροποιήσουν τις λύσεις τους με βάση τα πραγματικά χαρακτηριστικά του κτιρίου.

Το σχολείο παρουσιάζει, επιπλέον, συγκεκριμένα στοιχεία της υφιστάμενης κατάστασης που συνδέονται με το υπό διερεύνηση πρόβλημα. Σύμφωνα με την έκθεση ελέγχου, το κτίριο διαθέτει κεντρική θέρμανση, ενώ στα νότια ανοίγματα χρησιμοποιούνται κουρτίνες για την αντιηλιακή προστασία. Η αρχική διαμόρφωση του αερισμού έχει υποστεί μεταβολές, καθώς οι σχετικές οπές παραμένουν εμφανείς εξωτερικά, αλλά έχουν κλειστεί εσωτερικά και έχουν τοποθετηθεί ανεμιστήρες στα υαλοστάσια. Αναφέρεται ακόμη ότι κάποιες αίθουσες έχουν διαιρεθεί, έχουν προστεθεί προκατασκευασμένες αίθουσες για την κάλυψη λειτουργικών αναγκών και έχει χρησιμοποιηθεί άσφαλτος σε τμήμα του αύλειου χώρου.

Η ιστορική διάσταση του κτιρίου αποτέλεσε επίσης βασικό κριτήριο επιλογής. Τα Παπαστράτεια Εκπαιδευτήρια ανήκουν στα σχολικά κτίρια του Μεσοπολέμου στο Αγρίνιο και αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της εξέλιξης της σχολικής αρχιτεκτονικής και των αντίστοιχων προσπαθειών αποκατάστασης και προσαρμογής στις σύγχρονες ανάγκες. Ως εκ τούτου, η μελέτη τους επιτρέπει να εξεταστεί μία επιπλέον διάσταση της χρήσης της ΤΝ: κατά πόσο τα συστήματα μπορούν να προτείνουν σύγχρονες βιοκλιματικές παρεμβάσεις χωρίς να αντιμετωπίζουν το κτίριο ως ουδέτερο ή αποκομμένο από την ιστορική του ταυτότητα.

5.2.2 Επιλογή της νότιας ζώνης

Η αρχική σύλληψη της εργασίας αφορούσε ευρύτερα τον βιώσιμο επανασχεδιασμό ενός σχολικού συγκροτήματος και των υπαίθριων χώρων του. Ωστόσο, μια ολοκληρωμένη

διερεύνηση του συνόλου του Παπαστρατείου θα απαιτούσε εκτεταμένη αποτύπωση, ενεργειακές προσομοιώσεις, μετρήσεις εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, πλήρη καταγραφή των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων και αναλυτική μελέτη του αύλειου χώρου. Η επέκταση της έρευνας σε όλες αυτές τις παραμέτρους θα οδηγούσε σε υπερβολικά ευρύ αντικείμενο.

Για τον λόγο αυτό, το εμπειρικό πεδίο περιορίζεται στη νότια ζώνη του σχολείου. Η έννοια της ζώνης χρησιμοποιείται αντί της στενότερης έννοιας της όψης, επειδή η βιοκλιματική λειτουργία δεν εξαρτάται μόνο από την εξωτερική μορφή του κελύφους. Περιλαμβάνει τη σχέση των ανοιγμάτων με τις αντίστοιχες αίθουσες, τον τρόπο εισόδου του φυσικού φωτός, τις δυνατότητες αερισμού, τη χρήση των συστημάτων σκίασης και, στον βαθμό που υπάρχουν επαρκή στοιχεία, την επίδραση του άμεσα συνδεδεμένου εξωτερικού χώρου.

Η νότια ζώνη επιλέχθηκε επειδή συγκεντρώνει τέσσερις παραμέτρους που έχουν ήδη αναπτυχθεί στο θεωρητικό μέρος της εργασίας:

- τον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας,
- τη διατήρηση επαρκούς φυσικού φωτισμού,
- τη δυνατότητα φυσικού αερισμού,
- τη διαμόρφωση συνθηκών θερινής θερμικής άνεσης.

Οι παράμετροι αυτές δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Μια υπερβολικά εκτεταμένη ή λανθασμένα σχεδιασμένη σκίαση μπορεί να μειώσει την ηλιακή επιβάρυνση, αλλά ταυτόχρονα να περιορίσει τον φυσικό φωτισμό των αιθουσών. Αντίστοιχα, η αύξηση του αερισμού μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, χωρίς να εξασφαλίζει πάντοτε θερμική άνεση, ιδιαίτερα όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι υψηλές. Για τον λόγο αυτό, οι προτάσεις θα αξιολογηθούν ως συνδυασμένες βιοκλιματικές στρατηγικές και όχι ως απομονωμένα τεχνικά μέτρα (Temprano et al., 2020; Díaz-López et al., 2022).

Η επιλογή της νότιας ζώνης επιτρέπει επίσης να αξιοποιηθεί η ειδική λογική των σχολικών κτιρίων του Μεσοπολέμου. Στη σχετική ιστορική ανάλυση αναφέρεται η χρήση προστεγασμάτων με στόχο να επιτρέπεται ο χειμερινός ηλιασμός των αιθουσών και να περιορίζεται ο θερινός, σε συνδυασμό με αμφίπλευρο φωτισμό από μεσημβρινά και βόρεια ανοίγματα. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι δείχνει ότι ο

έλεγχος του ηλιασμού και ο συνδυασμός φωτισμού και αερισμού δεν αποτελούν ξένα στοιχεία προς την αρχική σχεδιαστική φιλοσοφία της περιόδου. Συνεπώς, μια σύγχρονη βιοκλιματική παρέμβαση μπορεί να επιδιώξει την επανερμηνεία και ενίσχυση της αρχικής περιβαλλοντικής λογικής του κτιρίου, αντί να εισαγάγει εντελώς ασύνδετες λύσεις.

5.2.3 Χωρικά και τεχνικά όρια της διερεύνησης

Η χωρική οριοθέτηση της έρευνας περιλαμβάνει:

- τη νότια όψη του 5ου Δημοτικού Σχολείου,
- τα νότια ανοίγματα του ισογείου και του πρώτου ορόφου,
- τις αίθουσες και τους λοιπούς χώρους που συνδέονται άμεσα με τα συγκεκριμένα ανοίγματα,
- τα στοιχεία σκίασης και αερισμού που επηρεάζουν τη λειτουργία της ζώνης,
- τον άμεσα γειτονικό εξωτερικό χώρο, μόνο στον βαθμό που αποτυπώνεται επαρκώς στο διαθέσιμο υλικό.

Ο άμεσα συνδεδεμένος εξωτερικός χώρος μπορεί να ληφθεί υπόψη κυρίως ως πιθανό πεδίο ήπιων παρεμβάσεων, όπως η τοποθέτηση φυτεύσεων σκίασης ή άλλων αναστρέψιμων στοιχείων. Δεν εξετάζεται, όμως, ως αυτοτελές αντικείμενο συνολικού ανασχεδιασμού της σχολικής αυλής, επειδή τα διαθέσιμα σχέδια δεν παρέχουν πλήρη και επικαιροποιημένη αποτύπωση της φύτευσης, των υλικών, των υψομετρικών διαφορών, των καθημερινών διαδρομών και των λειτουργικών ζωνών του προαυλίου.

Από τη μελέτη εξαιρούνται:

- η συνολική ενεργειακή αναβάθμιση ολόκληρου του συγκροτήματος,
- η πλήρης αναδιαμόρφωση της αυλής,
- ο στατικός και αντισεισμικός έλεγχος,
- η αναλυτική εξέταση των εγκαταστάσεων θέρμανσης και ψύξης,
- η πραγματοποίηση δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης,
- η ακριβής ποσοτικοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας,
- η αναλυτική κοστολόγηση των λύσεων,

- η εκπόνηση οριστικής αρχιτεκτονικής ή κατασκευαστικής μελέτης.

Οι παραπάνω εξαιρέσεις αποτελούν προϋποθέσεις που θα πρέπει να εξεταστούν σε επόμενο στάδιο πριν από την εφαρμογή οποιασδήποτε παρέμβασης. Στην παρούσα εργασία, όμως, η αξιολόγηση περιορίζεται στην ποιότητα και στη λογική των προκαταρκτικών σεναρίων που θα παραχθούν από το ChatGPT και το Gemini.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει εάν οι προτάσεις είναι θεωρητικά και τεχνικά εύλογες, εάν προσαρμόζονται στα διαθέσιμα στοιχεία του κτιρίου και εάν αναγνωρίζουν την ανάγκη πρόσθετων μετρήσεων και εξειδικευμένων μελετών.

5.3 Ερευνητικό υλικό και εργαλεία Τεχνητής Νοημοσύνης

Η ερευνητική διαδικασία βασίζεται στη χορήγηση κοινού πληροφοριακού υλικού σε δύο εφαρμογές παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης, το ChatGPT και το Gemini. Η χρήση του ίδιου υλικού και των ίδιων οδηγιών αποσκοπεί στη διαμόρφωση κατά το δυνατόν όμοιων συνθηκών, ώστε οι διαφορές των παραγόμενων σεναρίων να μπορούν να αποδοθούν κυρίως στον τρόπο επεξεργασίας και παραγωγής απαντήσεων από κάθε εργαλείο και όχι σε διαφορετική αρχική πληροφόρηση.

5.3.1 Ερευνητικό υλικό

Το υλικό που δόθηκε στις δύο εφαρμογές περιλαμβάνει αρχιτεκτονικά σχέδια, τεχνικές πληροφορίες και συνοπτικά στοιχεία σχετικά με την ιστορική και λειτουργική ταυτότητα του κτιρίου. Βασική πηγή αποτελεί η μελέτη του Γκρίζη (2015), η οποία περιλαμβάνει κατόψεις, όψεις, τομές, αξονομετρικές απεικονίσεις και έκθεση ελέγχου του σχολείου. Τα στοιχεία αυτά επιτρέπουν την προκαταρκτική κατανόηση της γεωμετρίας, της οργάνωσης και της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου.

Ειδικότερα, στο πληροφοριακό υλικό θα ενταχθούν:

- η κάτοψη του ισογείου,
- η κάτοψη του πρώτου ορόφου,
- η κάτοψη του υπογείου και του δώματος ως συμπληρωματικά στοιχεία,
- οι τέσσερις όψεις του κτιρίου,
- η επισήμανση της νότιας ζώνης που αποτελεί το πεδίο της έρευνας,

- στοιχεία από την έκθεση ελέγχου για την ηλιοπροστασία και τον αερισμό,
- σύντομη περιγραφή της αρχιτεκτονικής και ιστορικής φυσιογνωμίας,
- βασικά κλιματικά δεδομένα για την περιοχή του Αγρινίου.

Οι κατόψεις παρουσιάζουν τις κύριες στάθμες και τις χρήσεις των χώρων, όπως τις αίθουσες διδασκαλίας, τους διοικητικούς χώρους, την αίθουσα εκδηλώσεων και το εργαστήριο πληροφορικής. Οι όψεις αποτυπώνουν τη βόρεια, τη δυτική, τη νότια και την ανατολική πλευρά, επιτρέποντας τη σύνδεση των προτάσεων με τον πραγματικό προσανατολισμό του κτιρίου.

Στο κοινό υλικό περιλήφθηκε ακόμη η πληροφορία ότι στα νότια ανοίγματα χρησιμοποιούνται κουρτίνες για την αντιηλιακή προστασία, ενώ η αρχική διαμόρφωση του αερισμού έχει μεταβληθεί, καθώς ορισμένες οπές έχουν κλειστεί εσωτερικά και έχουν προστεθεί ανεμιστήρες στα υαλοστάσια. Οι κατόψεις και η νότια όψη συνοδεύονται από γραφική επισήμανση της περιοχής διερεύνησης. Με τον τρόπο αυτό, τα δύο εργαλεία θα μπορούν να αναγνωρίσουν ποια ανοίγματα, αίθουσες και τμήματα του κελύφους περιλαμβάνονται στην έρευνα.

5.3.2 Επιλογή των εργαλείων ΤΝ

Για την παραγωγή των εναλλακτικών σεναρίων επιλέγονται το ChatGPT και το Gemini. Πρόκειται για εφαρμογές που βασίζονται σε μεγάλα γλωσσικά μοντέλα και μπορούν να επεξεργάζονται κείμενα, εικόνες και αρχεία, καθώς και να παράγουν απαντήσεις με βάση φυσικογλωσσικές οδηγίες. Τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα χρησιμοποιούνται μέσω της διαδικασίας του prompting, κατά την οποία ο χρήστης καθορίζει το ζητούμενο, τα διαθέσιμα δεδομένα και τους περιορισμούς της εργασίας (Bommasani et al., 2021; Zhao et al., 2023).

Η επιλογή δύο διαφορετικών εφαρμογών επιτρέπει τη σύγκριση του τρόπου με τον οποίο κάθε σύστημα:

- αναγνωρίζει και αξιοποιεί το αρχιτεκτονικό υλικό,
- εντοπίζει τα βασικά προβλήματα της νότιας ζώνης,
- συνδυάζει διαφορετικά βιοκλιματικά κριτήρια,
- διατυπώνει και ιεραρχεί παρεμβάσεις,

- αναγνωρίζει τα όρια των διαθέσιμων δεδομένων.

Τα εργαλεία δεν χρησιμοποιούνται ως εφαρμογές ενεργειακής προσομοίωσης ή ως συστήματα παραγωγής ολοκληρωμένων κατασκευαστικών σχεδίων. Ο ρόλος τους περιορίζεται στην ανάλυση του παρεχόμενου υλικού και στη διαμόρφωση προκαταρκτικών σχεδιαστικών σεναρίων. Η σχετική βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η παραγωγική ΤΝ μπορεί να υποστηρίξει την παραγωγή και διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων στον κλάδο ΑΕCO, αλλά τα αποτελέσματά της χρειάζονται τεχνική επαλήθευση, καθώς μπορεί να περιλαμβάνουν ανακριβείς ή ανεπαρκώς τεκμηριωμένους ισχυρισμούς (Memon et al., 2025; Huang et al., 2023).

5.3.3 Κοινές συνθήκες χρήσης

Για κάθε εφαρμογή δημιουργήθηκε νέα συνομιλία, χωρίς χρήση προηγούμενου ιστορικού. Στη συνέχεια, αναρτήθηκαν τα ίδια αρχεία, με την ίδια σειρά, και δόθηκε το ίδιο συνοδευτικό πληροφοριακό κείμενο.

Στα εργαλεία διευκρινίστηκε ότι πρέπει:

- να βασιστούν στο παρεχόμενο υλικό,
- να μην θεωρήσουν ως βέβαια στοιχεία που δεν τεκμηριώνονται,
- να διακρίνουν τις παρατηρήσεις από τις υποθέσεις,
- να αναφέρουν ποια πρόσθετα δεδομένα ή τεχνικές μελέτες απαιτούνται,
- να λαμβάνουν υπόψη τον ιστορικό και αρχιτεκτονικό χαρακτήρα του σχολείου.

Οι απαντήσεις αποθηκεύτηκαν αυτούσιες, χωρίς γλωσσική ή τεχνική διόρθωση από τον ερευνητή.

5.4 Διαδικασία αποτύπωσης και ανάλυσης της υφιστάμενης κατάστασης

Πριν από τη χρήση του ChatGPT και του Gemini πραγματοποιείται προκαταρκτική αποτύπωση και ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης της νότιας ζώνης του σχολείου. Σκοπός της διαδικασίας είναι η συγκρότηση ενός κοινού και επαρκώς τεκμηριωμένου πληροφοριακού υποβάθρου, βάσει του οποίου τα δύο εργαλεία θα κληθούν να διαμορφώσουν τα εναλλακτικά σενάρια παρέμβασης.

Η ανάλυση βασίζεται στις διαθέσιμες κατόψεις, στις όψεις του κτιρίου, στην έκθεση ελέγχου της υφιστάμενης κατάστασης και στα βασικά κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής του Αγρινίου. Οι κατόψεις χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση της γεωμετρίας του κτιρίου, της διάταξης των περυγών, των επιπέδων, των αιθουσών και των βασικών λειτουργιών. Οι όψεις επιτρέπουν την εξέταση της θέσης, της επανάληψης και της μορφολογίας των ανοιγμάτων σε σχέση με τον προσανατολισμό του κτιρίου.

Η προκαταρκτική ανάλυση οργανώνεται γύρω από τέσσερις βασικές παραμέτρους:

1. τον προσανατολισμό και την ηλιακή έκθεση της νότιας όψης,
2. την υφιστάμενη μορφή ηλιοπροστασίας,
3. τις δυνατότητες φυσικού φωτισμού και αερισμού των αντίστοιχων αιθουσών,
4. τους αρχιτεκτονικούς και λειτουργικούς περιορισμούς των πιθανών παρεμβάσεων.

Ο προσανατολισμός εξετάζεται σε συνδυασμό με τη μορφή και τη θέση των ανοιγμάτων, καθώς η αποτελεσματικότητα της σκίασης και η είσοδος του φυσικού φωτός εξαρτώνται από τη γεωμετρία της όψης και την εποχική μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο έλεγχος του ηλιασμού, η σκίαση, ο φυσικός φωτισμός και ο φυσικός αερισμός αποτελούν αλληλοεξαρτώμενες στρατηγικές του βιοκλιματικού σχεδιασμού και δεν πρέπει να εξετάζονται αποσπασματικά (DeKay& Brown, 2014).

Ως προς την υφιστάμενη κατάσταση, η έκθεση ελέγχου αναφέρει ότι στα νότια ανοίγματα χρησιμοποιούνται κουρτίνες για την αντιηλιακή προστασία. Αναφέρεται επίσης ότι οι αρχικές οπές αερισμού έχουν κλειστεί εσωτερικά, ενώ στα υαλοστάσια έχουν τοποθετηθεί ανεμιστήρες. Τα στοιχεία αυτά καταγράφονται ως ενδείξεις πιθανών ζητημάτων ηλιοπροστασίας και αερισμού, χωρίς να θεωρούνται από μόνα τους επαρκή για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την πραγματική θερμική συμπεριφορά των αιθουσών.

Ιδιαίτερη προσοχή αποδίδεται στη σχέση μεταξύ ηλιοπροστασίας και φυσικού φωτισμού. Η προσθήκη ή ενίσχυση ενός συστήματος σκίασης μπορεί να περιορίσει τη θερμική επιβάρυνση, αλλά ενδέχεται παράλληλα να μειώσει τον φωτισμό στο εσωτερικό των αιθουσών. Αντίστοιχα, η ενίσχυση του φυσικού αερισμού πρέπει να συνεκτιμά τις εξωτερικές θερμοκρασίες, την ποιότητα του αέρα και τη δυνατότητα ελεγχόμενης λειτουργίας των ανοιγμάτων. Στα σχολικά κτίρια, ο φυσικός αερισμός συνδέεται τόσο με

την ποιότητα του εσωτερικού αέρα όσο και με τη θερμική άνεση και, επομένως, απαιτεί συνδυασμένη αξιολόγηση των δύο παραμέτρων (Temprano et al., 2020).

Η ανάλυση λαμβάνει επίσης υπόψη την ιστορική και μορφολογική φυσιογνωμία του κτιρίου. Η κανονικότητα των όψεων, η επανάληψη των ανοιγμάτων και η συνοχή της αρχιτεκτονικής σύνθεσης περιορίζουν τη δυνατότητα εφαρμογής ογκωδών ή μορφολογικά ασύμβατων προσθηκών. Για τον λόγο αυτό, οι πιθανές παρεμβάσεις θα πρέπει να αξιολογηθούν και ως προς την αναστρεψιμότητα, τη διακριτική ένταξη και τον βαθμό αλλοίωσης της υπάρχουσας όψης. Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τα Παπαστράτεια Εκπαιδευτήρια αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της μεσοπολεμικής σχολικής αρχιτεκτονικής στο Αγρίνιο.

Τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής ανάλυσης συγκεντρώθηκαν σε ένα κοινό πληροφοριακό κείμενο, το οποίο δόθηκε αυτούσιο και στα δύο εργαλεία ΤΝ:

- τα επιβεβαιωμένα στοιχεία που προκύπτουν από τα σχέδια και την έκθεση ελέγχου,
- το συγκεκριμένο πεδίο της παρέμβασης,
- τους βασικούς στόχους του βιοκλιματικού επανασχεδιασμού,
- τους αρχιτεκτονικούς περιορισμούς,
- τα στοιχεία που δεν είναι διαθέσιμα και απαιτούν περαιτέρω έλεγχο.

Στα μη διαθέσιμα στοιχεία περιλαμβάνονται οι θερμοφυσικές ιδιότητες του κελύφους, η κατάσταση και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κουφωμάτων, οι πραγματικές εσωτερικές θερμοκρασίες, οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα, τα πρότυπα λειτουργίας των ανοιγμάτων και οι πραγματικές ενεργειακές καταναλώσεις. Επομένως, οι προτάσεις που θα παραχθούν δεν θα αξιολογηθούν με βάση ακριβείς προβλέψεις εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά ως προς τη βιοκλιματική τους λογική, τη συνάφεια με το διαθέσιμο υλικό και την αναγνώριση της ανάγκης πρόσθετων τεχνικών μελετών.

Με τη διαδικασία αυτή διαμορφώνεται ένα κοινό σημείο εκκίνησης για το ChatGPT και το Gemini και περιορίζεται η πιθανότητα οι προτάσεις τους να βασιστούν σε διαφορετικές ή ατεκμηρίωτες παραδοχές.

5.5 Διαδικασία παραγωγής των εναλλακτικών σεναρίων

Η παραγωγή των εναλλακτικών σεναρίων πραγματοποιήθηκε μέσω της υποβολής κοινών και προκαθορισμένων prompts στο ChatGPT και στο Gemini. Η χρήση φυσικογλωσσικών οδηγιών επιτρέπει την προσαρμογή των μεγάλων γλωσσικών μοντέλων σε συγκεκριμένες εργασίες χωρίς πρόσθετη εκπαίδευση του συστήματος, υπό την προϋπόθεση ότι προσδιορίζονται με σαφήνεια το ζητούμενο, τα δεδομένα και οι βασικοί περιορισμοί (Bommasani et al., 2021; Zhao et al., 2023).

Για τη διατήρηση κοινών συνθηκών, τα δύο εργαλεία έλαβαν:

- τα ίδια αρχιτεκτονικά σχέδια,
- το ίδιο συνοδευτικό πληροφοριακό κείμενο,
- τα ίδια κλιματικά και τεχνικά στοιχεία,
- τα ίδια prompts, με την ίδια σειρά και διατύπωση.

5.5.1 Δομή των prompts

Η διαδικασία θα περιλαμβάνει τρία διαδοχικά prompts. Το πρώτο θα αφορά την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης, το δεύτερο την παραγωγή των εναλλακτικών σεναρίων και το τρίτο την ιεράρχηση και τον κριτικό έλεγχο των προτάσεων.

Prompt 1: Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης

Μελέτησε τα αρχιτεκτονικά σχέδια και τις πληροφορίες που σου δίνονται για το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο Αγρινίου. Εστίασε στη νότια όψη, στους χώρους που συνδέονται με αυτήν και, όπου υπάρχουν επαρκή στοιχεία, στον άμεσα γειτονικό εξωτερικό χώρο. Εντόπισε τα βασικά ζητήματα που αφορούν την ηλιοπροστασία, τον φυσικό φωτισμό, τον φυσικό αερισμό και τη θερινή θερμική άνεση. Να διακρίνεις σαφώς όσα προκύπτουν από το διαθέσιμο υλικό από όσα αποτελούν υποθέσεις ή απαιτούν πρόσθετη αυτοψία και μέτρηση.

Το πρώτο prompt αποσκοπεί στην εξέταση του τρόπου με τον οποίο κάθε εργαλείο αντιλαμβάνεται το κτίριο πριν προχωρήσει στην παραγωγή λύσεων. Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην ορθή ανάγνωση του προσανατολισμού, των ανοιγμάτων και των χρήσεων των χώρων.

Prompt 2: Παραγωγή εναλλακτικών σεναρίων

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, διαμόρφωσε δύο εναλλακτικά σενάρια για τη βιοκλιματική αναβάθμιση της νότιας ζώνης του σχολείου:

Σενάριο Α: Ελάχιστη και άμεσα εφαρμόσιμη παρέμβαση, με ήπιες, αναστρέψιμες και σχετικά περιορισμένου κόστους λύσεις.

Σενάριο Β: Ολοκληρωμένη βιοκλιματική αναβάθμιση, με περισσότερο εκτεταμένες, αλλά ρεαλιστικές παρεμβάσεις.

Για κάθε σενάριο πρότεινε έως πέντε συγκεκριμένες παρεμβάσεις. Για κάθε παρέμβαση να αναφέρεις το σημείο εφαρμογής, το πρόβλημα που αντιμετωπίζει, το αναμενόμενο όφελος, τις βασικές τεχνικές προϋποθέσεις και τους πιθανούς περιορισμούς. Οι προτάσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την ιστορική και αρχιτεκτονική φυσιογνωμία του κτιρίου.

Ο περιορισμός σε έως πέντε παρεμβάσεις ανά σενάριο αποσκοπεί στην αποφυγή εκτεταμένων καταλόγων γενικών ιδεών και στην υποχρέωση των εργαλείων να επιλέξουν και να ιεραρχήσουν τις σημαντικότερες λύσεις. Η παραγωγή περισσότερων της μίας εναλλακτικών επιτρέπει επίσης την εξέταση διαφορετικών συμβιβασμών μεταξύ έκτασης παρέμβασης, τεχνικής δυσκολίας και αναμενόμενου οφέλους. Η διερεύνηση και σύγκριση σχεδιαστικών επιλογών αποτελεί βασικό στοιχείο των διαδικασιών υποβοηθούμενου και παραγωγικού σχεδιασμού (Khan et al., 2025; Memon et al., 2025).

Prompt 3: Ιεράρχηση και κριτικός έλεγχος

Ιεράρχησε τις παρεμβάσεις κάθε σεναρίου από την περισσότερο άμεση και εφαρμόσιμη προς την περισσότερο σύνθετη. Στη συνέχεια, ανέφερε:

- α) ποιες προτάσεις στηρίζονται άμεσα στα διαθέσιμα σχέδια και στοιχεία,
- β) ποιες βασίζονται σε εύλογες υποθέσεις,
- γ) ποιες απαιτούν αυτοψία, μετρήσεις, ενεργειακή μελέτη ή άλλο τεχνικό έλεγχο,
- δ) ποιες ενδέχεται να επηρεάζουν την ιστορική και μορφολογική φυσιογνωμία του κτιρίου.

Το τρίτο prompt εισάγει μια διαδικασία αυτοελέγχου και επιδιώκει να εξετάσει κατά πόσο τα δύο εργαλεία αναγνωρίζουν τα όρια των απαντήσεών τους. Η συγκεκριμένη απαίτηση θεωρείται σημαντική, επειδή τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα είναι δυνατόν να παράγουν πειστικές αλλά μη επαρκώς τεκμηριωμένες πληροφορίες. Για τον λόγο αυτό, η

βιβλιογραφία προτείνει σαφή όρια χρήσης, διασταύρωση των αποτελεσμάτων και επαλήθευση από ειδικό (Huang et al., 2023; Tonmoy et al., 2024).

5.5.2 Περιεχόμενο των σεναρίων

Το σενάριο ελάχιστης παρέμβασης περιλαμβάνει λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν με περιορισμένες εργασίες και μικρή αλλοίωση του κτιρίου. Ενδεικτικά, μπορεί να αφορά τη βελτίωση των συστημάτων σκίασης, την καλύτερη λειτουργική αξιοποίηση των ανοιγμάτων και ήπιες παρεμβάσεις στον φυσικό αερισμό.

Το σενάριο ολοκληρωμένης αναβάθμισης επιτρέπει περισσότερο σύνθετες λύσεις, όπως συνολική αντιμετώπιση των κουφωμάτων, εξωτερικά συστήματα ηλιοπροστασίας, αποκατάσταση της αρχικής λογικής αερισμού και περιορισμένες παρεμβάσεις στον άμεσα συνδεδεμένο εξωτερικό χώρο.

5.5.3 Καταγραφή των αποτελεσμάτων

Για κάθε εφαρμογή καταγράφηκαν:

- η ημερομηνία χρήσης,
- η ακριβής έκδοση του μοντέλου,
- τα αρχεία που υποβλήθηκαν,
- τα πλήρη κείμενα των prompts,
- οι αυτούσιες απαντήσεις,
- τυχόν τεχνικά προβλήματα ή αδυναμίες ανάγνωσης των αρχείων.

5.6 Πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης των σεναρίων

Τα κριτήρια της συγκριτικής αξιολόγησης δεν προέρχονται αυτούσια από ένα ενιαίο σύστημα πιστοποίησης ή από ένα τυποποιημένο εργαλείο αξιολόγησης εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης. Διαμορφώθηκαν ως σύνθετο αναλυτικό πλαίσιο, προσαρμοσμένο στον σκοπό και στη μελέτη περίπτωσης της παρούσας έρευνας. Η επιλογή τους βασίστηκε σε τρεις συμπληρωματικές ομάδες βιβλιογραφίας: α) στα συστήματα και στους δείκτες αξιολόγησης της βιωσιμότητας και της περιβαλλοντικής άνεσης σχολικών κτιρίων, β) στη βιβλιογραφία για τη βιώσιμη και ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων και ιστορικών κτιρίων και γ) στα πλαίσια αξιόπιστης και υπεύθυνης χρήσης της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Ειδικότερα, η βιοκλιματική καταλληλότητα και η τεχνική εφαρμοσιμότητα συνδέονται με τις κατηγορίες περιβαλλοντικής άνεσης, ενεργειακής απόδοσης και βιώσιμης ανακαίνισης που χρησιμοποιούνται σε εργαλεία αξιολόγησης σχολικών κτιρίων (Le et al., 2021; Saraiva et al., 2018, 2019). Η αρχιτεκτονική συμβατότητα βασίζεται στις αρχές σύμφωνα με τις οποίες οι επεμβάσεις σε ιστορικά ή παραδοσιακά κτίρια πρέπει να εξισορροπούν την ενεργειακή βελτίωση με τη διατήρηση του υφιστάμενου κτιριακού υλικού και των χαρακτηριστικών της αρχιτεκτονικής φυσιογνωμίας (Webb, 2017). Τέλος, η αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού και η τεκμηρίωση και αναγνώριση των περιορισμών συνδέονται με τις απαιτήσεις εγκυρότητας, διαφάνειας, ιχνηλασιμότητας, ανθρώπινης εποπτείας και αναγνώρισης της αβεβαιότητας κατά την αξιολόγηση αποτελεσμάτων TN (AI HLEG, 2019; Autio et al., 2024; Tabassi, 2023).

5.6.1 Κριτήρια αξιολόγησης

Η αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων - δύο από το ChatGPT και δύο από το Gemini- έγινε βάσει πέντε κριτηρίων:

Κριτήριο	Περιεχόμενο αξιολόγησης
Αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού	Εξετάζεται εάν το σενάριο χρησιμοποιεί ορθά τις κατόψεις, τις όψεις, τις φωτογραφίες, τον προσανατολισμό και τις τεχνικές πληροφορίες της υφιστάμενης κατάστασης.
Βιοκλιματική καταλληλότητα	Αξιολογείται εάν οι προτάσεις αντιμετωπίζουν με συνεκτικό τρόπο την ηλιοπροστασία, τον φυσικό φωτισμό, τον φυσικό αερισμό και τη θερινή θερμική άνεση.
Τεχνική εφαρμοσιμότητα	Εξετάζεται ο ρεαλισμός των προτάσεων, η δυνατότητα εφαρμογής τους στο συγκεκριμένο κτίριο και η ανάγκη πρόσθετων τεχνικών ελέγχων.
Αρχιτεκτονική συμβατότητα	Αξιολογείται ο σεβασμός στη μορφολογία, στα υλικά, στον ρυθμό των ανοιγμάτων και στον ιστορικό χαρακτήρα του σχολικού κτιρίου.
Τεκμηρίωση και	Εξετάζεται εάν οι προτάσεις αιτιολογούνται επαρκώς και εάν

αναγνώριση περιορισμών	δηλώνονται οι υποθέσεις, τα δεδομένα που λείπουν και η ανάγκη περαιτέρω μελέτης.
-----------------------------------	--

Πίνακας 1 Κριτήρια αξιολόγησης

5.6.2 Κλίμακα βαθμολόγησης

Κάθε σενάριο βαθμολογήθηκε σε κάθε κριτήριο με κλίμακα από 1 έως 5:

Βαθμός	Ερμηνεία
1	Πολύ ανεπαρκής ανταπόκριση στο κριτήριο
2	Περιορισμένη ανταπόκριση, με σημαντικές ελλείψεις
3	Ικανοποιητική ανταπόκριση, αλλά με επιμέρους αδυναμίες
4	Πολύ καλή ανταπόκριση, με σαφή τεκμηρίωση και περιορισμένες ελλείψεις
5	Εξαιρετική ανταπόκριση, πλήρως προσαρμοσμένη στη συγκεκριμένη περίπτωση

Πίνακας 2 Κλίμακα βαθμολόγησης

Όλα τα κριτήρια έχουν την ίδια βαρύτητα, ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή αυθαίρετων συντελεστών στάθμισης. Η μέγιστη συνολική βαθμολογία κάθε σεναρίου θα είναι 25 βαθμοί. Κάθε βαθμολογία θα συνοδεύεται από σύντομη ποιοτική αιτιολόγηση. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να εξηγηθεί γιατί ένα σενάριο έλαβε συγκεκριμένη βαθμολογία και ποια σημεία του θεωρήθηκαν ιδιαίτερα ισχυρά ή προβληματικά.

5.6.3 Αξιολόγηση των επιμέρους παρεμβάσεων

Εκτός από τη συνολική αποτίμηση των σεναρίων, εξετάστηκε χωριστά κάθε προτεινόμενη παρέμβαση. Οι παρεμβάσεις ταξινομήθηκαν σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- **εφαρμόσιμη**, όταν μπορεί να ενταχθεί στο κτίριο χωρίς ουσιώδεις τεχνικές ή αρχιτεκτονικές αντιρρήσεις,

- **εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις**, όταν η βασική ιδέα θεωρείται κατάλληλη αλλά χρειάζεται προσαρμογή,
- **μη εφαρμόσιμη**, όταν συγκρούεται με τα διαθέσιμα στοιχεία, τη λειτουργία ή τη μορφολογία του κτιρίου,
- **μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα δεδομένα**, όταν απαιτούνται μετρήσεις, αυτοψία ή ειδική τεχνική μελέτη.

Η τελευταία κατηγορία είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η έλλειψη επαρκών πληροφοριών δεν σημαίνει απαραίτητα ότι μια πρόταση είναι λανθασμένη. Σημαίνει ότι δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί στο παρόν στάδιο.

5.6.4 Συγκριτική παρουσίαση

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε συγκριτικούς πίνακες, στους οποίους αποτυπώνονται οι βαθμολογίες, οι βασικές προτάσεις και οι σημαντικότερες παρατηρήσεις για κάθε σενάριο, σε δύο επίπεδα:

1. μεταξύ του σεναρίου ελάχιστης και του σεναρίου ολοκληρωμένης παρέμβασης που παρήγαγε το ίδιο εργαλείο,
2. μεταξύ των αντίστοιχων σεναρίων του ChatGPT και του Gemini.

5.7 Εγκυρότητα, αξιοπιστία και περιορισμοί της έρευνας

Η ενίσχυση της εγκυρότητας, της συνέπειας και της διαφάνειας της έρευνας επιδιώχθηκε μέσω της εφαρμογής κοινών συνθηκών κατά τη χρήση του ChatGPT και του Gemini. Τα δύο εργαλεία έλαβαν το ίδιο πληροφοριακό υλικό, το οποίο περιλάμβανε τα ίδια αρχιτεκτονικά σχέδια, τις ίδιες φωτογραφίες, τις ίδιες τεχνικές περιγραφές και τα ίδια βασικά κλιματικά δεδομένα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε κοινός κορμός τριών prompts, τα οποία υποβλήθηκαν στην ελληνική γλώσσα, με την ίδια σειρά και την ίδια βασική διατύπωση. Η χρήση κοινού υλικού και προκαθορισμένων οδηγιών περιόρισε τις διαφοροποιήσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν από άνισες εισροές και διευκόλυνε τη συγκριτική εξέταση των απαντήσεων.

Για κάθε εργαλείο χρησιμοποιήθηκε νέα και ανεξάρτητη συνομιλία, χωρίς αξιοποίηση προηγούμενου ιστορικού. Η καταγραφή των οδηγιών, των απαντήσεων, της ημερομηνίας χρήσης και της δηλωμένης έκδοσης των εφαρμογών είναι σημαντική, επειδή η απόδοση των μεγάλων γλωσσικών μοντέλων επηρεάζεται από το περιεχόμενο της συνομιλίας, τη διατύπωση των οδηγιών και τη συγκεκριμένη έκδοση του συστήματος που χρησιμοποιείται (Bommasani et al., 2021;Zhao et al., 2023).

Η εγκυρότητα της ανάλυσης ενισχύθηκε επίσης μέσω της αξιοποίησης διαφορετικών πηγών πληροφοριών για τη μελέτη περίπτωσης. Τα δεδομένα για το σχολικό κτίριο προήλθαν από αρχιτεκτονικά σχέδια και όψεις, τεχνικές πληροφορίες, φωτογραφική τεκμηρίωση, βασικά κλιματικά στοιχεία και σχετική βιβλιογραφία. Η συνδυασμένη εξέταση διαφορετικών μορφών τεκμηρίωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική στις αρχιτεκτονικές μελέτες περίπτωσης, επειδή επιτρέπει τη διασταύρωση των παρατηρήσεων και την ανάλυση του κτιρίου μέσα στο συγκεκριμένο χωρικό, ιστορικό και λειτουργικό του πλαίσιο (Groat&Wang, 2013).

Το κοινό πλαίσιο αξιολόγησης εφαρμόστηκε με τον ίδιο τρόπο και στα τέσσερα σενάρια. Η χρήση προκαθορισμένων κριτηρίων και ενιαίας πενταβάθμιας κλίμακας περιόρισε την ασυνέπεια κατά τη σύγκριση. Παράλληλα, κάθε αριθμητική βαθμολογία συνοδεύτηκε από ποιοτική και τεχνική αιτιολόγηση, ώστε να είναι εμφανής η σύνδεσή της με τα διαθέσιμα δεδομένα και με το περιεχόμενο κάθε σεναρίου. Η διαδικασία αυτή ενισχύει τη διαφάνεια και την ελεγκτικότητα της αξιολόγησης, χωρίς να εξαλείφει πλήρως το στοιχείο της ερμηνευτικής κρίσης που χαρακτηρίζει την ποιοτική αποτίμηση σύνθετων αρχιτεκτονικών προτάσεων (Groat&Wang, 2013).

6. Παρουσίαση και συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων

6.1 Εφαρμογή του ερευνητικού πρωτοκόλλου

Μετά την ολοκλήρωση του κοινού πληροφοριακού πακέτου εφαρμόστηκε το ερευνητικό πρωτόκολλο στα δύο επιλεγμένα εργαλεία παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης. Σκοπός της διαδικασίας ήταν η παραγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων σχετικά με την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης και τη διαμόρφωση εναλλακτικών σεναρίων βιοκλιματικής αναβάθμισης για τη νότια ζώνη του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου.

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσω δύο χωριστών συνομιλιών. Στην πρώτη χρησιμοποιήθηκε το ChatGPT με το μοντέλο GPT-5.6 Thinking, ενώ στη δεύτερη χρησιμοποιήθηκε το Gemini, το οποίο στο αρχείο της διαδικασίας καταγράφηκε ως Gemini 1.5 Pro/ Gemini Advanced, έκδοση Ιουλίου 2026. Η εφαρμογή στο Gemini πραγματοποιήθηκε στις 19 Ιουλίου 2026 και η εφαρμογή στο ChatGPT στις 20 Ιουλίου 2026. Και στις δύο περιπτώσεις η διαδικτυακή αναζήτηση παρέμεινε ανενεργή, ώστε οι απαντήσεις να βασιστούν στο κοινό πληροφοριακό υλικό και όχι σε πρόσθετες εξωτερικές πηγές.

Παράμετρος	ChatGPT	Gemini
Εργαλείο	ChatGPT	Διεπαφή συνομιλίας Gemini
Μοντέλο, όπως καταγράφηκε	GPT-5.6 Thinking	Gemini 1.5 Pro/ Gemini Advanced, έκδοση Ιουλίου 2026
Ημερομηνία εφαρμογής	20 Ιουλίου 2026	19 Ιουλίου 2026
Τύπος λογαριασμού	ChatGPTPlus	Flash
Διαδικτυακή αναζήτηση	Δεν πραγματοποιήθηκε	Ανενεργή
Βασικό υλικό εισόδου	Κοινό πληροφοριακό πακέτο για το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο	Το ίδιο κοινό πληροφοριακό πακέτο
Παραγόμενα	Ανάλυση υφιστάμενης κατάστασης,	Ανάλυση υφιστάμενης

Παράμετρος	ChatGPT	Gemini
αποτελέσματα	δύο σενάρια και κριτικός έλεγχος	κατάστασης, δύο σενάρια και κριτικός έλεγχος

Πίνακας 3 Βασικά στοιχεία εφαρμογής του ερευνητικού πρωτοκόλλου

Το κοινό πληροφοριακό πακέτο περιλάμβανε την περιγραφή και την οριοθέτηση της μελέτης περίπτωσης, αρχιτεκτονικά σχέδια, όψεις, φωτογραφική τεκμηρίωση, στοιχεία για την υφιστάμενη κατάσταση, βασικά κλιματικά δεδομένα και σαφή καταγραφή των πληροφοριών που δεν ήταν διαθέσιμες. Με αυτόν τον τρόπο τα δύο μοντέλα κλήθηκαν να επεξεργαστούν το ίδιο αρχιτεκτονικό και τεχνικό υπόβαθρο. Δεν τους ζητήθηκε να εκπονήσουν τελική μελέτη εφαρμογής ή να υπολογίσουν συγκεκριμένες τιμές ενεργειακής εξοικονόμησης, αλλά να παράγουν προκαταρκτικές και τεχνικά αιτιολογημένες κατευθύνσεις σχεδιασμού.

Η κύρια διαδικασία περιλάμβανε τρία διαδοχικά prompts. Το πρώτο αφορούσε την προκαταρκτική ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης της νότιας ζώνης. Τα δύο μοντέλα κλήθηκαν να εξετάσουν την ηλιακή έκθεση και την ηλιοπροστασία, τον φυσικό φωτισμό, τον φυσικό αερισμό, τη θερινή θερμική άνεση, τη χρήση των κλιματιστικών μονάδων, τη σχέση με τον αύλειο χώρο και τους αρχιτεκτονικούς περιορισμούς των πιθανών παρεμβάσεων. Παράλληλα, ζητήθηκε να διακρίνουν τις επιβεβαιωμένες πληροφορίες από τις εύλογες υποθέσεις και από τα ζητήματα που απαιτούσαν πρόσθετη τεχνική διερεύνηση.

Στο δεύτερο prompt ζητήθηκε από κάθε μοντέλο να διαμορφώσει δύο διακριτά σενάρια. Το Σενάριο Α αφορούσε μία ελάχιστη και άμεσα εφαρμόσιμη παρέμβαση, με ήπιες, περιορισμένης έκτασης και κατά προτίμηση αναστρέψιμες λύσεις. Το Σενάριο Β αφορούσε μία περισσότερο ολοκληρωμένη βιοκλιματική αναβάθμιση, η οποία θα αντιμετώπιζε συνδυαστικά την ηλιοπροστασία, τον φωτισμό, τον αερισμό και τη θερινή θερμική άνεση. Για κάθε σενάριο ζητήθηκαν έως πέντε συγκεκριμένες παρεμβάσεις, μαζί με το πεδίο εφαρμογής, το αναμενόμενο όφελος, τις τεχνικές προϋποθέσεις, τους περιορισμούς και τα πρόσθετα στοιχεία που θα απαιτούνταν.

Το τρίτο prompt επικεντρώθηκε στην ιεράρχηση και στον κριτικό έλεγχο των προτάσεων. Τα μοντέλα κλήθηκαν να κατατάξουν τις παρεμβάσεις από την περισσότερο άμεση προς

την περισσότερη σύνθετη, να εκτιμήσουν τον βαθμό τεχνικής εφαρμοσιμότητάς τους και να αναγνωρίσουν ποιες από αυτές απαιτούσαν αυτοψία, μετρήσεις ή ειδική τεχνική μελέτη. Ζητήθηκε επίσης να εντοπίσουν τις προτάσεις με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα και όσες θα μπορούσαν να επηρεάσουν την αρχιτεκτονική φυσιογνωμία του κτιρίου.

Οι απαντήσεις διατηρήθηκαν αυτούσιες σε δύο χωριστά αρχεία, χωρίς γλωσσική διόρθωση, συμπλήρωση ή αναδιατύπωση. Για τη διευκόλυνση της παρουσίασης και της σύγκρισης, τα αποτελέσματα κωδικοποιούνται ως εξής:

- **C1:** ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης από το ChatGPT,
- **C2A και C2B:** ελάχιστο και ολοκληρωμένο σενάριο του ChatGPT,
- **C3:** ιεράρχηση και κριτικός έλεγχος από το ChatGPT,
- **G1:** ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης από το Gemini,
- **G2A και G2B:** ελάχιστο και ολοκληρωμένο σενάριο του Gemini,
- **G3:** ιεράρχηση και κριτικός έλεγχος από το Gemini.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αρχικά τα ευρήματα από την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης και στη συνέχεια τα τέσσερα παραγόμενα σενάρια, η συγκριτική αξιολόγησή τους και ο κριτικός αυτοέλεγχος των δύο μοντέλων.

6.2 Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης από τα δύο μοντέλα

Στο πρώτο στάδιο της εφαρμογής, το ChatGPT και το Gemini κλήθηκαν να αναλύσουν την υφιστάμενη κατάσταση της νότιας ζώνης του σχολικού κτιρίου, χωρίς να προτείνουν ακόμη συγκεκριμένες κατασκευαστικές παρεμβάσεις. Η ανάλυση περιλάμβανε την ηλιακή έκθεση, την ηλιοπροστασία, τον φυσικό φωτισμό και αερισμό, τη θερινή θερμική άνεση, τη χρήση των κλιματιστικών μονάδων, τη σχέση με τον αύλειο χώρο και τους αρχιτεκτονικούς περιορισμούς.

Οι απαντήσεις των δύο μοντέλων παρουσίασαν σημαντικό βαθμό σύγκλισης ως προς την αναγνώριση των βασικών χαρακτηριστικών και προβλημάτων της εξεταζόμενης ζώνης. Και τα δύο αξιοποίησαν τα σχέδια, τις φωτογραφίες, την τεχνική καταγραφή και τα

κλιματικά δεδομένα του κοινού πληροφοριακού πακέτου. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς το επίπεδο λεπτομέρειας, τον τρόπο διαχείρισης της αβεβαιότητας και τον βαθμό κατηγορηματικότητας με τον οποίο διατυπώθηκαν ορισμένα συμπεράσματα.

Παράμετρος	ChatGPT	Gemini	Συγκριτική παρατήρηση
Ηλιακή έκθεση και ηλιοπροστασία	Αναγνώρισε τον νότιο προσανατολισμό, τη συνεχή σειρά ανοιγμάτων, τις κουρτίνες και τα παντζούρια, αλλά επισήμανε ότι η αποτελεσματικότητα της υφιστάμενης προστασίας δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί χωρίς πρόσθετα στοιχεία.	Εντόπισε τα μεγάλα νότια ανοίγματα και θεώρησε ανεπαρκή την εξωτερική ηλιοπροστασία, ιδιαίτερα στον όροφο.	Τα μοντέλα συμφώνησαν ως προς το βασικό ζήτημα. Το ChatGPT διατύπωσε περισσότερο επιφυλακτική εκτίμηση, ενώ το Gemini κατέληξε σε πιο σαφή διάγνωση ανεπάρκειας.
Φυσικός φωτισμός	Αναγνώρισε σημαντικό δυναμικό φυσικού φωτισμού, αλλά τόνισε ότι δεν υπάρχουν μετρήσεις για την ομοιομορφία, τη θάμβωση και τον φωτισμό στο βάθος των αιθουσών.	Αναγνώρισε υψηλό δυναμικό φυσικού φωτισμού και πιθανότητα θάμβωσης ή υπερβολικής χρήσης των κουρτινών.	Οι δύο αναλύσεις ήταν παρόμοιες, με το ChatGPT να αναπτύσσει περισσότερο τις ελλείψεις των δεδομένων.
Φυσικός αερισμός	Διαπίστωσε μεταβολή της αρχικής λογικής αερισμού, αλλά απέφυγε να θεωρήσει αποδεδειγμένη την ανεπάρκεια του σημερινού συστήματος.	Χαρακτήρισε το κλείσιμο των οπών και των βόρειων υαλοστασίων ως ακύρωση του αρχικού διαμπερούς αερισμού.	Το Gemini ήταν πιο κατηγορηματικό ως προς τη λειτουργική συνέπεια των μεταβολών.
Θερινή θερμική	Συνέδεσε το θερμό κλίμα,	Αναγνώρισε	Και τα δύο μοντέλα

Παράμετρος	ChatGPT	Gemini	Συγκριτική παρατήρηση
άνεση	τον νότιο προσανατολισμό και την αβέβαιη ηλιοπροστασία με πιθανή θερινή επιβάρυνση, χωρίς να θεωρήσει αποδεδειγμένη την υπερθέρμανση.	πιθανότητα υπερθέρμανσης και θεώρησε τη θερμική μάζα της λιθοδομής πιθανό πλεονέκτημα.	αναγνώρισαν το πρόβλημα ως πιθανό. Το ChatGPT διατήρησε μεγαλύτερη επιφύλαξη απέναντι στην περιβαλλοντική απόδοση της λιθοδομής.
Κλιματιστικές μονάδες	Κατέγραψε την τοπική χρήση κλιματιστικών και την οπτική επίδραση των μονάδων και των δικτύων, χωρίς να εξαγάγει συμπεράσματα για την ενεργειακή τους απόδοση.	Τόνισε την αισθητική και μορφολογική υποβάθμιση και διατύπωσε πιθανότητα χαμηλής απόδοσης παλαιών μονάδων.	Και τα δύο αναγνώρισαν το μορφολογικό ζήτημα. Το Gemini προχώρησε σε υπόθεση για την απόδοση των μονάδων χωρίς διαθέσιμα στοιχεία ηλικίας ή ενεργειακής κλάσης.
Αύλειος χώρος	Χαρακτήρισε πιθανή τη μικροκλιματική επιβάρυνση από τις εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες, αλλά σημείωσε την απουσία μετρήσεων.	Θεώρησε ότι η άσφαλτος λειτουργεί ως συσσωρευτής θερμότητας και δημιουργεί δυσμενές μικροκλίμα μπροστά από τις	Η κατεύθυνση της ανάλυσης ήταν κοινή, αλλά το Gemini παρουσίασε την επίδραση του αύλειου χώρου με μεγαλύτερη βεβαιότητα.

Παράμετρος	ChatGPT	Gemini	Συγκριτική παρατήρηση
		αίθουσες.	
Αρχιτεκτονικοί περιορισμοί	Εστίασε στη λιθοδομή, στα κουφώματα, στον ρυθμό των ανοιγμάτων, στο πρότυπο, στη μεικτή κατασκευή και στην άγνωστη δυνατότητα αγκύρωσης νέων στοιχείων.	Εστίασε στην ανεπίχριστη λιθοδομή, στον ρυθμό των ανοιγμάτων και στην αδυναμία εφαρμογής μορφολογικά ασύμβατων συστημάτων.	Και τα δύο αναγνώρισαν τον ιστορικό χαρακτήρα ως βασικό περιορισμό. Το ChatGPT ανέπτυξε περισσότερο τις τεχνικές και θεσμικές αβεβαιότητες.
Ασφάλεια και λειτουργία	Εξέτασε τα μεταλλικά πλέγματα, τη λειτουργία των ανοιγμάτων, την πυρασφάλεια, τη διαφυγή και την ασφάλεια των μαθητών.	Επισήμανε ότι οι λύσεις δεν πρέπει να παρεμποδίζουν τη σχολική λειτουργία ή τη διαφυγή.	Υπήρξε σύγκλιση, αλλά το ChatGPT ανέπτυξε αναλυτικότερα τη συγκεκριμένη παράμετρο.

Πίνακας 4 Συγκριτική παρουσίαση της ανάλυσης της υφιστάμενης κατάστασης

Ηλιακή έκθεση, ηλιοπροστασία και φυσικός φωτισμός

Κοινό σημείο των δύο απαντήσεων αποτέλεσε η αναγνώριση της σημασίας του νότιου προσανατολισμού και της συνεχούς διάταξης μεγάλων ανοιγμάτων. Και τα δύο μοντέλα επισήμαναν ότι τα ανοίγματα δημιουργούν δυνατότητα αξιοποίησης του φυσικού φωτισμού, αλλά παράλληλα αυξάνουν την πιθανότητα θερμής ηλιακής επιβάρυνσης και θάμβωσης.

Το ChatGPT διέκρινε την επιβεβαιωμένη παρουσία κουρτινών, εσωτερικών στοιχείων σκίασης και παντζουριών από την πραγματική αποτελεσματικότητά τους. Τόνισε ότι δεν ήταν γνωστά το ποσοστό κάλυψης, ο τρόπος λειτουργίας, η διάρκεια χρήσης και η σχέση τους με τον πραγματικό ηλιασμό κάθε αίθουσας. Επομένως, χαρακτήρισε την πιθανή

ανεπάρκεια της ηλιοπροστασίας εύλογη υπόθεση και όχι επιβεβαιωμένη τεχνική αστοχία. Αντίστοιχα, επισήμανε ότι τα σχέδια και οι φωτογραφίες δεν επαρκούν για να προσδιοριστούν η ομοιομορφία του φωτισμού, η εμφάνιση θάμβωσης ή η ύπαρξη σκοτεινών ζωνών στο εσωτερικό.

Το Gemini χαρακτήρισε περισσότερο άμεσα την εξωτερική ηλιοπροστασία του ορόφου ως ανεπαρκή. Υποστήριξε ότι οι εσωτερικές κουρτίνες επιτρέπουν στην ακτινοβολία να διαπερνά τα υαλοστάσια και να επιβαρύνει θερμικά τις αίθουσες, ενώ παράλληλα αναγνώρισε ότι η διαρκής χρήση τους ενδέχεται να μειώνει τον φυσικό φωτισμό. Η διαπίστωση αυτή είναι συμβατή με τη γενική βιοκλιματική λογική, αλλά παρουσιάστηκε με μεγαλύτερη βεβαιότητα από όση επέτρεπαν οι διαθέσιμες μετρήσεις.

Φυσικός αερισμός και ποιότητα του εσωτερικού αέρα

Η μεταβολή της αρχικής λειτουργίας του αερισμού αναγνωρίστηκε και από τα δύο μοντέλα ως ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα. Το ChatGPT σημείωσε ότι το κλείσιμο των βόρειων υαλοστασίων και των εσωτερικών πλευρών των οπών αερισμού αποτελεί ένδειξη μεταβολής της αρχικής διαδρομής του αέρα. Ωστόσο, διευκρίνισε ότι δεν αποδεικνύεται από το υλικό πως ο σημερινός αερισμός είναι ανεπαρκής. Για ασφαλές συμπέρασμα θα απαιτούνταν έλεγχος των γριλιών, των ανεμιστήρων, των ανοιγόμενων τμημάτων των κουφωμάτων και των πραγματικών διαδρομών και παροχών του αέρα.

Αντίθετα, το Gemini χρησιμοποίησε τον όρο «ακύρωση του συστήματος φυσικού αερισμού» και συνέδεσε άμεσα τις μεταβολές με εγκλωβισμό θερμότητας και ρύπων. Παράλληλα, ανέδειξε ως δυνατότητα την επαναλειτουργία του ιστορικού συστήματος. Η συγκεκριμένη απάντηση εντόπισε με σαφήνεια την αρχιτεκτονική λογική του αρχικού σχεδιασμού, αλλά μετέτρεψε μία τεκμηριωμένη μεταβολή του συστήματος σε περισσότερο οριστική διάγνωση της σημερινής περιβαλλοντικής του απόδοσης.

Θερμική άνεση και ενεργητική ψύξη

Και τα δύο μοντέλα συσχέτισαν τις υψηλές θερινές θερμοκρασίες του Αγρινίου με τον νότιο προσανατολισμό και την κατάσταση της ηλιοπροστασίας. Το ChatGPT χαρακτήρισε την υπερθέρμανση πιθανή, επισημαίνοντας ότι δεν υπήρχαν εσωτερικές θερμοκρασίες, στοιχεία υγρασίας, επιφανειακές θερμοκρασίες ή καταγραφές ωρών θερμικής δυσφορίας.

Επίσης, απέφυγε να θεωρήσει τη φέρουσα λιθοδομή αυτόματα ευνοϊκό στοιχείο, καθώς δεν ήταν διαθέσιμες οι θερμοφυσικές της ιδιότητες.

Το Gemini ανέφερε επίσης πιθανή υπερθέρμανση, αλλά παρουσίασε τη θερμική μάζα της λιθοδομής ως δυνατότητα που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί. Η προσέγγιση αυτή αναγνώρισε μια πιθανή βιοκλιματική ιδιότητα του κελύφους, χωρίς όμως να μπορεί να επιβεβαιώσει την πραγματική της επίδραση λόγω της απουσίας στοιχείων για το πάχος, τη σύσταση, τη θερμοχωρητικότητα και τη συνολική λειτουργία του κελύφους.

Ως προς τα κλιματιστικά, και τα δύο μοντέλα αξιοποίησαν τη φωτογραφική τεκμηρίωση και αναγνώρισαν ότι οι εξωτερικές μονάδες, οι σωληνώσεις και οι καλωδιώσεις επηρεάζουν την εικόνα της λιθόκτιστης όψης. Το ChatGPT παρέμεινε κυρίως στην καταγραφή της τοπικής και αποσπασματικής μορφής της ψύξης και στην ανάγκη συλλογής πληροφοριών για τον αριθμό, την ισχύ, την ηλικία και το πρόγραμμα λειτουργίας των μονάδων. Το Gemini πρόσθεσε την πιθανότητα χαμηλής ενεργειακής απόδοσης παλαιών μονάδων, παρότι η ηλικία και η ενεργειακή τους κλάση δεν περιλαμβάνονταν στα διαθέσιμα δεδομένα.

Αύλειος χώρος και μικροκλιματικές συνθήκες

Ο αύλειος χώρος αναγνωρίστηκε και στις δύο απαντήσεις ως τμήμα του προβλήματος και όχι απλώς ως ουδέτερο περιβάλλον γύρω από το κτίριο. Η εκτεταμένη παρουσία ασφάλτου και άλλων σκληρών επιφανειών, σε συνδυασμό με την κυρίως περιμετρική φύτευση, θεωρήθηκε πιθανός παράγοντας θερμικής επιβάρυνσης.

Το ChatGPT διατύπωσε τη σχέση αυτή ως εύλογο ενδεχόμενο, σημειώνοντας ότι δεν υπήρχαν επιφανειακές θερμοκρασίες, μικροκλιματικές μετρήσεις, ακριβής διάκριση των υλικών, πλήρης αποτύπωση της φύτευσης ή καταγραφή της κίνησης του αέρα. Αντίθετα, το Gemini παρουσίασε την ασφαλτο ως συσσωρευτή θερμότητας που αυξάνει την επιφανειακή θερμοκρασία μπροστά από τις αίθουσες. Και εδώ, τα δύο μοντέλα κατευθύνθηκαν προς το ίδιο πιθανό πρόβλημα, αλλά διαφοροποιήθηκαν ως προς τον βαθμό βεβαιότητας.

Αρχιτεκτονική φυσιογνωμία και τεχνικοί περιορισμοί

Ιδιαίτερα υψηλή σύγκλιση εμφανίστηκε ως προς την ανάγκη προστασίας της αρχιτεκτονικής ταυτότητας του κτιρίου. Και τα δύο μοντέλα αναγνώρισαν ως βασικά στοιχεία την ανεπείχριστη λιθοδομή, τα πολυδιαιρεμένα ξύλινα κουφώματα, τον ρυθμό των ανοιγμάτων και την κεντρική διαμόρφωση της εισόδου.

Το ChatGPT προσέθεσε στην ανάλυση τη μεικτή κατασκευή, την άγνωστη στατική επάρκεια, τη δυνατότητα αγκύρωσης νέων στοιχείων, το πιθανό θεσμικό καθεστώς προστασίας και τις απαιτήσεις αδειοδότησης. Υπογράμμισε ότι η νότια όψη δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ουδέτερη επιφάνεια στην οποία μπορούν να προστεθούν ελεύθερα νέα συστήματα.

Το Gemini έδωσε μεγαλύτερη έμφαση στη μορφολογική υποβάθμιση που προκαλούν οι μεταγενέστερες προσθήκες. Χαρακτήρισε την τοποθέτηση κλιματιστικών, καλωδιώσεων και πλεγμάτων ως τεχνική προχειρότητα που υποβαθμίζει την αρχιτεκτονική αξία της όψης. Η διατύπωση αυτή ήταν περισσότερο αξιολογική από εκείνη του ChatGPT και προανήγγειλε τη μεταγενέστερη έμφαση του Gemini στη «μορφολογική εξυγίανση».

Ελλείποντα δεδομένα

Τα δύο μοντέλα συμφώνησαν σε μεγάλο βαθμό ως προς τις πληροφορίες που απαιτούνταν για ασφαλέστερη αξιολόγηση. Και τα δύο ζήτησαν:

- θερμοφυσικά στοιχεία της λιθοδομής, του δώματος και των δαπέδων,
- χαρακτηριστικά υαλοπινάκων και κουφωμάτων,
- δεδομένα για την αεροστεγανότητα και τη λειτουργική κατάσταση των ανοιγμάτων,
- εσωτερικές θερμοκρασίες, υγρασία, CO₂ και επίπεδα φωτισμού,
- στοιχεία αριθμού, ισχύος, ενεργειακής κλάσης και κατανάλωσης των κλιματιστικών,
- στατική αξιολόγηση και πληροφορίες για το καθεστώς προστασίας,

- ακριβέστερη αποτύπωση των υλικών, των υψομετρικών διαφορών και της φύτευσης της αυλής.

Το ChatGPT παρουσίασε τα ελλείποντα δεδομένα με περισσότερο αναλυτική και λειτουργικά οργανωμένη μορφή. Εκτός από τα παραπάνω, αναφέρθηκε στην ανάγκη καταγραφής του τρόπου χρήσης των σκιάστρων, των ανοιγόμενων τμημάτων, των πραγματικών παροχών αέρα, της επίδρασης των πλεγμάτων, των ωραρίων λειτουργίας των κλιματιστικών και των απαιτήσεων πυρασφάλειας και εκκένωσης.

Σχεδιαστικές προτεραιότητες

Η σημαντικότερη διαφορά εμφανίστηκε στον τρόπο διατύπωσης των προτεραιοτήτων του επόμενου σταδίου. Το ChatGPT έθεσε ως πρώτη προτεραιότητα την τεκμηρίωση μέσω αυτοψίας και μετρήσεων. Στη συνέχεια πρότεινε τη συνδυασμένη εξέταση ηλιασμού, φωτισμού και θερμικής άνεσης, τη διερεύνηση της αρχικής λογικής αερισμού, τη βελτίωση των παθητικών συνθηκών πριν από την αναδιοργάνωση της ψύξης, την ενιαία αντιμετώπιση κτιρίου και αύλειου χώρου, τη διατήρηση της μορφολογικής ταυτότητας και τη συμβατότητα με τη σχολική λειτουργία και ασφάλεια.

Το Gemini έθεσε επίσης ως προτεραιότητες την αρχιτεκτονική συμβατότητα, την επαναλειτουργία των φυσικών μηχανισμών αερισμού και την ασφάλεια των χρηστών. Ωστόσο, περιέλαβε ήδη περισσότερο συγκεκριμένες κατευθύνσεις, όπως την απομάκρυνση ή ενσωμάτωση των κλιματιστικών, την αντικατάσταση σκληρών υλικών της αυλής με ψυχρά ή φυσικά υλικά και τη στρατηγική τοποθέτηση φυλλοβόλων δέντρων. Με τον τρόπο αυτό προχώρησε εν μέρει από την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης στην προκαταρκτική πρόταση λύσεων, παρότι το πρώτο prompt ζητούσε να μην προταθούν ακόμη συγκεκριμένες κατασκευαστικές παρεμβάσεις.

6.3 Παρουσίαση των σεναρίων του ChatGPT

Μετά την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης, το ChatGPT διαμόρφωσε δύο εναλλακτικά σενάρια βιοκλιματικής αναβάθμισης. Το πρώτο βασίστηκε κυρίως στη συντήρηση και στην καλύτερη αξιοποίηση των υφιστάμενων στοιχείων, ενώ το δεύτερο προέβλεπε περισσότερο εκτεταμένη και συνδυασμένη παρέμβαση στη νότια όψη, στα κουφώματα, στον αερισμό, στο σύστημα ψύξης και στον άμεσα γειτονικό αύλειο χώρο.

Το μοντέλο διευκρίνισε εξ αρχής ότι οι προτάσεις αποτελούν προκαταρκτικές σχεδιαστικές κατευθύνσεις και όχι έτοιμες λύσεις εφαρμογής. Δεν προσδιόρισε διαστάσεις, τεχνικές προδιαγραφές, κόστος ή ποσοτικά ενεργειακά οφέλη, αναφέροντας ότι η εξειδίκευση των παρεμβάσεων προϋποθέτει αυτοψία, μετρήσεις και επιμέρους τεχνικές μελέτες.

6.3.1 Σενάριο C2A: Ελάχιστη και άμεσα εφαρμόσιμη παρέμβαση

Το πρώτο σενάριο οργανώθηκε γύρω από την αρχή της αξιοποίησης των στοιχείων που υπάρχουν ήδη στο κτίριο. Το ChatGPT δεν θεώρησε δεδομένο ότι τα κουφώματα, τα παντζούρια, οι κουρτίνες, οι γρίλιες αερισμού ή τα κλιματιστικά λειτουργούν αποτελεσματικά. Για τον λόγο αυτό πρότεινε πρώτα την καταγραφή και τον τεχνικό τους έλεγχο και στη συνέχεια περιορισμένες εργασίες συντήρησης, ρύθμισης ή επιλεκτικής αποκατάστασης.

Κωδικός	Προτεινόμενη παρέμβαση	Βασικός στόχος	Κύριες προϋποθέσεις και περιορισμοί
C2A-1	Συντήρηση και λειτουργική επαναφορά των υφιστάμενων στοιχείων ηλιοπροστασίας	Καλύτερος έλεγχος του άμεσου ηλιασμού και της θάμβωσης	Καταγραφή των κουρτινών, των εσωτερικών σκιάστρων και των παντζουριών ανά άνοιγμα, έλεγχος της κατάστασής τους και οργάνωση της χρήσης τους ανά εποχή και ώρα
C2A-2	Συντήρηση και ρύθμιση των ξύλινων κουφωμάτων	Βελτίωση της δυνατότητας ελεγχόμενου φυσικού αερισμού και περιορισμός πιθανών ανεπιθύμητων διηθήσεων	Διατήρηση της μορφής και της πολυδιαίρεσης, έλεγχος ξυλείας, υαλοπινάκων, μηχανισμών και αεροστεγανότητας
C2A-3	Διερευνητικός έλεγχος και επιλεκτική	Πιθανή ενίσχυση της ανανέωσης του αέρα	Μη καταστροφικός έλεγχος των οπών, των βόρειων

Κωδικός	Προτεινόμενη παρέμβαση	Βασικός στόχος	Κύριες προϋποθέσεις και περιορισμοί
	αποκατάσταση των υφιστάμενων διαδρομών αερισμού	και της απομάκρυνσης θερμότητας	υαλοστασίων και των ανεμιστήρων, χωρίς νέα διάτρηση της λιθοδομής
C2A-4	Συντήρηση και συντονισμένη λειτουργία των κλιματιστικών μονάδων και περιορισμένη τακτοποίηση των δικτύων	Λειτουργική βελτίωση της ψύξης και μείωση της οπτικής ασυνέχειας της όψης	Απογραφή των μονάδων, έλεγχος απόδοσης, ωραρίου, κατανάλωσης, σωληνώσεων και καλωδιώσεων
C2A-5	Πιλοτική και αναστρέψιμη ενίσχυση σκίασης και φύτευσης στην αυλή	Δημιουργία τοπικών σκιασμένων σημείων και περιορισμός της έκθεσης των επιφανειών και των χρηστών στην ακτινοβολία	Χρήση κινητών ή αφαιρούμενων στοιχείων, διατήρηση των διαδρομών κίνησης, της επιτήρησης, της απορροής και της πρόσβασης έκτακτης ανάγκης

Πίνακας 5 Παρεμβάσεις του ελάχιστου σεναρίου του ChatGPT

Η πρώτη παρέμβαση επικεντρώθηκε στα υφιστάμενα μέσα ηλιοπροστασίας. Το μοντέλο πρότεινε έλεγχο της λειτουργίας των ξύλινων παντζουριών, των κουρτινών και των εσωτερικών στοιχείων σκίασης. Παράλληλα, επισήμανε ότι οι κουρτίνες δεν πρέπει να παραμένουν μονίμως κλειστές όταν αυτό μειώνει υπερβολικά τον φυσικό φωτισμό. Η πρόταση συνοδεύτηκε από την ανάγκη καταγραφής της θάμβωσης, των ωρών άμεσου ηλιασμού και των επιπέδων φωτισμού ανά αίθουσα.

Η δεύτερη παρέμβαση αφορούσε τα ξύλινα πολυδαιρεμένα κουφώματα. Το ChatGPT απέφυγε να προτείνει γενικευμένη αντικατάστασή τους και προέκρινε την αποτύπωση και τη συντήρησή τους. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διατήρηση των διατομών, της μορφής

και της πολυδιαίρεσης, καθώς τα στοιχεία αυτά συνδέονται άμεσα με την αρχιτεκτονική ταυτότητα του κτιρίου. Η ακριβής μορφή των εργασιών θα εξαρτιόταν από την κατάσταση της ξυλείας, των υαλοπινάκων, των μηχανισμών και των αρμών κάθε ανοίγματος.

Η τρίτη παρέμβαση περιλάμβανε τον διερευνητικό έλεγχο των τετράγωνων γριλιών της λιθοδομής, των κλεισμένων βόρειων υαλοστασίων και των ανεμιστήρων. Το μοντέλο δεν πρότεινε άμεσο άνοιγμα των οπών, αλλά προηγούμενο μη καταστροφικό έλεγχο της συνέχειας και της κατάστασής τους. Η αποκατάσταση θα πραγματοποιούνταν επιλεκτικά, μόνο όπου θα επιβεβαιωνόταν η τεχνική, υγειονομική και λειτουργική καταλληλότητά της.

Η τέταρτη πρόταση αφορούσε την απογραφή, τη συντήρηση και τον συντονισμό της λειτουργίας των κλιματιστικών με τη σκίαση και τον φυσικό αερισμό. Παράλληλα, προτάθηκε περιορισμένη τακτοποίηση των εμφανών καλωδιώσεων και σωληνώσεων, χωρίς όμως μη αναστρέψιμες επεμβάσεις στη λιθοδομή ή παρεμπόδιση του αερισμού και της συντήρησης των εξωτερικών μονάδων.

Η τελευταία παρέμβαση του ελάχιστου σεναρίου μεταφέρθηκε στον αύλειο χώρο. Το ChatGPT πρότεινε πιλοτική τοποθέτηση αναστρέψιμων στοιχείων σκίασης και περιορισμένη ενίσχυση της φύτευσης σε σημεία που δεν αποτελούν κύριες ζώνες κίνησης, εισόδου ή συγκέντρωσης. Η επιλογή των σημείων θα έπρεπε να βασιστεί σε τοπογραφική αποτύπωση, καταγραφή της κυκλοφορίας των μαθητών και έλεγχο των δικτύων και της απορροής των ομβρίων.

Συνολικά, το Σενάριο C2A χαρακτηρίζεται από περιορισμένη κατασκευαστική όχληση, υψηλό βαθμό αναστρεψιμότητας και μικρή αναμενόμενη επίδραση στη μορφή της όψης. Εστιάζει περισσότερο στη βελτίωση της καθημερινής λειτουργίας, στη συντήρηση και στη συλλογή συμπληρωματικών δεδομένων παρά στη ριζική αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

6.3.2 Σενάριο C2B: Ολοκληρωμένη βιοκλιματική αναβάθμιση

Το δεύτερο σενάριο αντιμετώπισε τη νότια ζώνη ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα. Στο σύστημα αυτό εντάχθηκαν η ηλιακή πρόσπτωση στα ανοίγματα, ο φυσικός φωτισμός, η

κατάσταση των κουφωμάτων, οι διαδρομές αερισμού, η λειτουργία των κλιματιστικών και το μικροκλίμα του αύλειου χώρου.

Κωδικός	Προτεινόμενη παρέμβαση	Βασικός στόχος	Κύριες προϋποθέσεις και περιορισμοί
C2B-1	Ενιαίο εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας ανά ομάδα ανοιγμάτων	Περιορισμός της άμεσης θερινής ακτινοβολίας πριν αυτή εισέλθει μέσω των υαλοπινάκων	Ηλιακή μελέτη, αποτύπωση των ανοιγμάτων, στατικός έλεγχος και μορφολογική προσαρμογή στον ρυθμό της όψης
C2B-2	Ολοκληρωμένη αποκατάσταση των ξύλινων κουφωμάτων και διερεύνηση συμβατής αναβάθμισης των υαλοπινάκων	Καλύτερος έλεγχος των θερμικών ανταλλαγών και των διηθήσεων	Διατήρηση της εξωτερικής μορφής, έλεγχος υγρασίας και συμπίκνωσης και πιλοτική εφαρμογή πριν από γενίκευση
C2B-3	Αποκατάσταση οργανωμένου φυσικού και υποβοηθούμενου αερισμού	Δημιουργία ελεγχόμενης διαδρομής αέρα μεταξύ νότιας και βόρειας πλευράς	Μέτρηση παροχών, CO ₂ , θορύβου και εξωτερικών συνθηκών και έλεγχος πυρασφάλειας και ασφάλειας
C2B-4	Αναδιοργάνωση του συστήματος ενεργητικής ψύξης και μορφολογική ενσωμάτωση των εξωτερικών μονάδων	Συντονισμός ενεργητικής και παθητικής λειτουργίας και βελτίωση της εικόνας της όψης	Υπολογισμός ψυκτικών φορτίων, ηλεκτρομηχανολογική μελέτη, έλεγχος θορύβου, συντήρησης και αποχέτευσης συμπυκνωμάτων
C2B-5	Μερική βιοκλιματική αναδιαμόρφωση του αύλειου χώρου	Βελτίωση του μικροκλίματος και δημιουργία σκιασμένων	Τοπογραφική και μικροκλιματική μελέτη, έλεγχος δικτύων και απορροής, επιλογή κατάλληλων υλικών

Κωδικός	Προτεινόμενη παρέμβαση	Βασικός στόχος	Κύριες προϋποθέσεις και περιορισμοί
		περιοχών παραμονής	και φυτικών ειδών

Πίνακας 6 Παρεμβάσεις του ολοκληρωμένου σεναρίου του ChatGPT

Η πρώτη παρέμβαση προέβλεπε νέο εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας. Το σύστημα δεν διατυπώθηκε ως συνεχές και ομοιόμορφο στέγαστρο, αλλά ως επαναλαμβανόμενη μονάδα που θα ακολουθούσε τις ομάδες και τον ρυθμό των ανοιγμάτων. Το μοντέλο τόνισε ότι η γεωμετρία του δεν πρέπει να καθοριστεί εμπειρικά, αλλά να προκύψει από ηλιακή μελέτη, ώστε να περιορίζεται η θερινή ακτινοβολία χωρίς υπερβολική μείωση του διάχυτου φυσικού φωτισμού.

Η δεύτερη παρέμβαση αφορούσε την ολοκληρωμένη αποκατάσταση των κουφωμάτων και τη διερεύνηση ενός δευτερεύοντος εσωτερικού υαλοστασίου ή άλλης συμβατής αναβάθμισης των υαλοπινάκων. Η λύση επιλέχθηκε ώστε να διατηρηθεί η εξωτερική μορφή των ξύλινων πλαισίων. Το μοντέλο αναγνώρισε, ωστόσο, τον κίνδυνο συμπύκνωσης, αύξησης του βάρους, παρεμπόδισης του ανοίγματος και σύγκρουσης με τις απαιτήσεις καθαρισμού, διαφυγής και ασφάλειας. Για τον λόγο αυτό πρότεινε την κατασκευή δοκιμαστικού τμήματος πριν από οποιαδήποτε γενικευμένη εφαρμογή.

Η τρίτη παρέμβαση αντιμετώπισε τον αερισμό ως συνολικό σύστημα και όχι ως άνοιγμα μεμονωμένων παραθύρων. Περιλάμβανε τα νότια ανοίγματα, τα βόρεια υαλοστάσια, τις τετράγωνες γρίλιες και τους υφιστάμενους ανεμιστήρες. Η υποβοηθούμενη λειτουργία θα χρησιμοποιούνταν μόνο όταν οι φυσικές συνθήκες δεν επαρκούσαν, ενώ θα προηγούνταν μετρήσεις παροχών, CO₂, θορύβου και εξωτερικών πιέσεων.

Η τέταρτη παρέμβαση αφορούσε την αναδιοργάνωση της ενεργητικής ψύξης μετά την εφαρμογή των παθητικών μέτρων. Προτάθηκε επανεκτίμηση των πραγματικών ψυκτικών φορτίων, καλύτερος συντονισμός των κλιματιστικών με τη σκίαση και τον αερισμό και συγκέντρωση ή διακριτική ενσωμάτωση των εξωτερικών μονάδων και των δικτύων τους. Οποιοδήποτε νέο περίβλημα θα έπρεπε να εξασφαλίζει τον απαιτούμενο αερισμό, τη συντήρηση και τον έλεγχο του θορύβου.

Η πέμπτη πρόταση περιλάμβανε επιλεκτική απομείωση των σκληρών επιφανειών της αυλής, ενίσχυση της φύτευσης και δημιουργία σκιασμένων ζωνών. Το μοντέλο απέφυγε

να προτείνει γενική ανακατασκευή του συνόλου της αυλής και περιόρισε την παρέμβαση στον άμεσα γειτονικό χώρο της νότιας όψης. Η τελική διαμόρφωση θα έπρεπε να διατηρεί τις κύριες διαδρομές, την επιτήρηση, την προσβασιμότητα, τις ανάγκες εκκένωσης και την ορατότητα της ιστορικής όψης.

6.3.3 Διαφοροποίηση των δύο σεναρίων

Η βασική διαφοροποίηση των δύο προσεγγίσεων εντοπίζεται στον βαθμό επέμβασης. Το Σενάριο C2A βασίζεται στη συντήρηση, στη ρύθμιση και στην επιλεκτική επαναλειτουργία των υπαρχόντων στοιχείων. Το Σενάριο C2B συμπληρώνει τα υφιστάμενα στοιχεία με νέα συστήματα, περισσότερο σύνθετες κατασκευαστικές εργασίες και διεπιστημονική τεχνική μελέτη.

Στην ηλιοπροστασία, το πρώτο σενάριο αξιοποιεί κυρίως τις κουρτίνες και τα παντζούρια, ενώ το δεύτερο εισάγει νέο εξωτερικό σύστημα. Στον αερισμό, το πρώτο προβλέπει διερευνητική και επιλεκτική αποκατάσταση, ενώ το δεύτερο συνολική οργάνωση της διαδρομής του αέρα. Αντίστοιχα, στον αύλειο χώρο το πρώτο περιορίζεται σε πιλοτικές αναστρέψιμες εφαρμογές, ενώ το δεύτερο προτείνει μερική ανασύνθεση των επιφανειών και της φύτευσης.

Το ChatGPT δεν παρουσίασε τα δύο σενάρια ως αμοιβαία αποκλειόμενες τελικές επιλογές. Το ελάχιστο σενάριο μπορεί να λειτουργήσει ως πρώτο στάδιο καταγραφής, συντήρησης και πιλοτικής εφαρμογής, ενώ το ολοκληρωμένο σενάριο εκφράζει μια πιθανή επόμενη φάση, εφόσον προηγηθούν οι απαιτούμενες μετρήσεις και τεχνικές μελέτες.

6.4 Παρουσίαση των σεναρίων του Gemini

Το Gemini παρήγαγε επίσης δύο εναλλακτικά σενάρια για τη βιοκλιματική αναβάθμιση της νότιας ζώνης. Το πρώτο περιλάμβανε ήπιες και άμεσα εφαρμόσιμες επεμβάσεις, οι οποίες βασίζονταν κυρίως στην επαναλειτουργία υφιστάμενων στοιχείων και σε περιορισμένες εσωτερικές ή εξωτερικές μεταβολές. Το δεύτερο προέβλεπε περισσότερο εκτεταμένες παρεμβάσεις στη νότια και στη βόρεια όψη, στον αύλειο χώρο, στις εγκαταστάσεις ψύξης και στα στοιχεία προστασίας των ανοιγμάτων.

Σε σχέση με το ChatGPT, το Gemini διατύπωσε τις προτάσεις του με περισσότερο συγκεκριμένο κατασκευαστικό χαρακτήρα. Πρότεινε, μεταξύ άλλων, νέα ξύλινα παντζούρια, αφαίρεση ασφάλτου, αντικατάσταση υλικών επίστρωσης, μετακίνηση των κλιματιστικών μονάδων και ανασχεδιασμό των προστατευτικών πλεγμάτων. Παράλληλα, συνέδεσε τις προτάσεις του με την επιδίωξη «μορφολογικής εξυγίανσης» της όψης, αποδίδοντας ιδιαίτερη σημασία στην απομάκρυνση ή στην ενσωμάτωση των μεταγενέστερων προσθηκών.

6.4.1 Σενάριο G2A: Ελάχιστη και άμεσα εφαρμόσιμη παρέμβαση

Η λογική του πρώτου σεναρίου βασίστηκε στη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση των υφιστάμενων στοιχείων του σχολείου και στην εφαρμογή παρεμβάσεων που, σύμφωνα με το μοντέλο, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν χωρίς σημαντική αλλοίωση του κελύφους. Το Gemini χαρακτήρισε τις προτεινόμενες λύσεις ήπιες, περιορισμένης έκτασης και, στις περισσότερες περιπτώσεις, αναστρέψιμες.

Κωδικός	Προτεινόμενη παρέμβαση	Βασικός στόχος	Κύριες προϋποθέσεις και περιορισμοί
G2A-1	Επαναλειτουργία των υφιστάμενων ξύλινων παντζουριών	Εξωτερική σκίαση των ανοιγμάτων του ισογείου	Έλεγχος των μηχανισμών, αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων και συντήρηση της ξυλείας
G2A-2	Αντικατάσταση των εσωτερικών κουρτινών με κουρτίνες υψηλής ανακλαστικότητας	Περιορισμός της ηλιακής επιβάρυνσης και της θάμβωσης, με διατήρηση του φυσικού φωτισμού	Επιλογή κατάλληλου υφάσματος και προηγούμενη μέτρηση φωτισμού και θάμβωσης
G2A-3	Καθαρισμός και διάνοιξη των υφιστάμενων οπών αερισμού	Επαναφορά της παθητικής ανανέωσης του αέρα	Έλεγχος της πραγματικής διαδρομής των οπών, απομάκρυνση των εσωτερικών φραγών και τοποθέτηση ρυθμιζόμενης περσίδας

Κωδικός	Προτεινόμενη παρέμβαση	Βασικός στόχος	Κύριες προϋποθέσεις και περιορισμοί
G2A-4	Τοπική απομάκρυνση ασφάλτου και δημιουργία περιμετρικών ζωνών φύτευσης	Περιορισμός της θερμικής επιβάρυνσης του υπαίθριου χώρου κοντά στην όψη	Έλεγχος υπόγειων δικτύων, υγρασίας θεμελίωσης, βατότητας και ασφάλειας
G2A-5	Συντήρηση και ρύθμιση των υφιστάμενων ανεμιστήρων	Υποβοήθηση της απαγωγής θερμού αέρα και ενίσχυση της αίσθησης δροσισμού	Έλεγχος ηλεκτρολογικής ασφάλειας, παροχής, θορύβου, κατάστασης και ισχύος

Πίνακας 7 Παρεμβάσεις του ελάχιστου σεναρίου του Gemini

Η πρώτη παρέμβαση αφορούσε την επαναλειτουργία των ξύλινων παντζουριών που υπάρχουν σε τμήματα του ισογείου. Το Gemini πρότεινε τον έλεγχο των μηχανισμών κίνησης, την αντικατάσταση των φθαρμένων εξαρτημάτων και τη συντήρηση της ξυλείας. Η λύση παρουσιάστηκε ως μορφολογικά συμβατή, καθώς αξιοποιεί αυθεντικά στοιχεία της όψης χωρίς την προσθήκη νέων κατασκευών.

Η δεύτερη παρέμβαση προέβλεπε την αντικατάσταση των υφιστάμενων κουρτινών με εσωτερικές κουρτίνες υψηλότερης ανακλαστικότητας. Σύμφωνα με το μοντέλο, η λύση θα μπορούσε να περιορίσει την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και να βελτιώσει την κατανομή του φωτός, χωρίς να επηρεάσει την εξωτερική όψη. Παράλληλα, αναγνωρίστηκε η ανάγκη προηγούμενων μετρήσεων φωτισμού και θάμβωσης, ώστε η νέα επιλογή να μην προκαλέσει υπερβολική μείωση του φυσικού φωτισμού.

Η τρίτη πρόταση αφορούσε τον εσωτερικό καθαρισμό και τη διάνοιξη των υφιστάμενων οπών αερισμού. Το Gemini θεώρησε ότι η απομάκρυνση των εσωτερικών φραγών και η προσθήκη ρυθμιζόμενων εσωτερικών περσίδων θα μπορούσαν να επαναφέρουν μέρος της αρχικής παθητικής λειτουργίας, χωρίς μεταβολή των εξωτερικών γριλιών. Ωστόσο, η πρόταση εξαρτήθηκε από την επιβεβαίωση της πραγματικής συνέχειας και της κατάστασης των οπών μέσα στην τοιχοποιία.

Η τέταρτη παρέμβαση εισήγαγε μία περισσότερο κατασκευαστική μεταβολή στον αύλειο χώρο. Προτάθηκε η τοπική αφαίρεση τμημάτων ασφάλτου κοντά στη βάση της νότιας

όψης και η δημιουργία ζωνών χαμηλής φύτευσης. Ως αναμενόμενο όφελος αναφέρθηκε η βελτίωση του τοπικού μικροκλίματος και ο περιορισμός της ανάκλασης και της αποθήκευσης θερμότητας. Η εφαρμογή της λύσης προϋπέθετε έλεγχο των υπόγειων δικτύων, της υγρασίας κοντά στα θεμέλια, της βατότητας και της ασφάλειας των μαθητών.

Η πέμπτη πρόταση αφορούσε τη συντήρηση και τη λειτουργική ρύθμιση των ανεμιστήρων που είχαν τοποθετηθεί στα υαλοστάσια. Το Gemini πρότεινε ηλεκτρολογικό έλεγχο, καθαρισμό και καταγραφή της παροχής και της στάθμης θορύβου, ώστε να εξεταστεί η δυνατότητα υποβοήθησης της απομάκρυνσης του θερμού αέρα.

Το Σενάριο G2A διατηρεί γενικά περιορισμένη επίδραση στην εξωτερική μορφή του κτιρίου. Παρ' όλα αυτά, η τοπική αφαίρεση της ασφάλτου και η δημιουργία ζωνών φύτευσης αποτελούν περισσότερο σύνθετη παρέμβαση από τις υπόλοιπες και δεν είναι εξίσου άμεσα αναστρέψιμες. Επομένως, στο εσωτερικό του σεναρίου παρατηρείται μία σχετική διαφοροποίηση μεταξύ των απλών εργασιών συντήρησης και της κατασκευαστικής επέμβασης στον αύλειο χώρο.

6.4.2 Σενάριο G2B: Ολοκληρωμένη βιοκλιματική αναβάθμιση

Στο ολοκληρωμένο σενάριο το Gemini αντιμετώπισε το κτίριο και τον αύλειο χώρο ως ενιαίο σύστημα και πρότεινε περισσότερο εκτεταμένες μεταβολές. Η βασική λογική του περιλάμβανε την αποκατάσταση του φυσικού αερισμού, την ενίσχυση της εξωτερικής ηλιοπροστασίας, τη ριζικότερη αναμόρφωση του αύλειου χώρου και την αισθητική και λειτουργική αναδιοργάνωση των μεταγενέστερων εγκαταστάσεων της όψης.

Κωδικός	Προτεινόμενη παρέμβαση	Βασικός στόχος	Κύριες προϋποθέσεις και περιορισμοί
G2B-1	Τοποθέτηση νέων μορφολογικά συμβατών ξύλινων παντζουριών	Εξωτερική ηλιοπροστασία των ανοιγμάτων του πρώτου ορόφου και των τμημάτων του ισογείου χωρίς	Σχεδιασμός βάσει των υφιστάμενων προτύπων, στατικός έλεγχος της λιθοδομής και έγκριση αρμόδιων φορέων

Κωδικός	Προτεινόμενη παρέμβαση	Βασικός στόχος	Κύριες προϋποθέσεις και περιορισμοί
		παντζούρια	
G2B-2	Αποκατάσταση και τεχνική αναβάθμιση των κλεισμένων βόρειων υαλοστασίων	Επαναφορά του διαμπερούς φυσικού αερισμού	Αφαίρεση μεταγενέστερων φραγών, νέα ανοιγόμενα πλαίσια και μελέτη απαιτούμενων παροχών
G2B-3	Συνολική αντικατάσταση των σκληρών υλικών της αυλής με ψυχρά ή διαπερατά υλικά και ενίσχυση της φύτευσης	Περιορισμός των επιφανειακών θερμοκρασιών και βελτίωση του μικροκλίματος	Πλήρης τοπογραφική και μικροκλιματική μελέτη, διατήρηση της ασφάλειας και των αθλητικών και λειτουργικών χρήσεων
G2B-4	Συγκέντρωση, απόκρυψη ή αντικατάσταση των κλιματιστικών μονάδων	Βελτίωση της μορφολογικής εικόνας και πιθανή ενεργειακή αναβάθμιση	Ηλεκτρομηχανολογική μελέτη, έλεγχος νέων θέσεων, ισχύος, απόδοσης και διαδρομών δικτύων
G2B-5	Ενσωμάτωση των προστατευτικών πλεγμάτων στα νέα ξύλινα κουφώματα	Μορφολογική ενοποίηση και διατήρηση της ασφάλειας με μικρότερη οπτική παρεμπόδιση	Ειδικός σχεδιασμός κουφωμάτων και πιστοποίηση ισοδύναμης προστασίας για σχολική χρήση

Πίνακας 8 Παρεμβάσεις του ολοκληρωμένου σεναρίου του Gemini

Η πρώτη παρέμβαση προέβλεπε την προσθήκη νέων ξύλινων παντζουριών στα ανοίγματα του πρώτου ορόφου και σε όσα τμήματα του ισογείου δεν διέθεταν αντίστοιχη προστασία. Η μορφή των νέων στοιχείων θα βασιζόταν στα υφιστάμενα παντζούρια, με στόχο τη μορφολογική συνέχεια και την εξωτερική παρεμπόδιση της ακτινοβολίας. Το Gemini επισήμανε την ανάγκη στατικού ελέγχου της λιθοδομής για την αγκύρωση των μεντεσέδων και την πιθανή ανάγκη έγκρισης από αρμόδιους φορείς.

Η δεύτερη πρόταση αφορούσε την αποκατάσταση των κλεισμένων βόρειων υαλοστασίων. Το μοντέλο πρότεινε την αφαίρεση των μεταγενέστερων φραγών και την τοποθέτηση νέων ανοιγόμενων πλαισίων, θεωρώντας ότι η παρέμβαση θα επανέφερε τη δυνατότητα ημερήσιου και νυχτερινού διαμπερούς αερισμού. Η λύση συνδέθηκε με την αρχική αρχιτεκτονική λογική του κτιρίου, αλλά προϋπέθετε μελέτη φυσικού αερισμού και υπολογισμό των απαιτούμενων παροχών.

Η τρίτη παρέμβαση ήταν η περισσότερο εκτεταμένη πρόταση στον εξωτερικό χώρο. Περιλάμβανε συνολική αποξήλωση της ασφάλτου, χρήση ψυχρών ή διαπερατών υλικών και προσθήκη στοιχείων πρασίνου και δέντρων. Το Gemini συνέδεσε την πρόταση με την αντιμετώπιση του τοπικού φαινομένου θερμικής νησίδας και τη μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών. Αναγνώρισε, ωστόσο, ότι θα απαιτούνταν πλήρης τοπογραφική και μικροκλιματική μελέτη και διατήρηση των λειτουργικών, αθλητικών και ασφαλών χρήσεων της αυλής.

Η τέταρτη πρόταση αφορούσε τη συγκέντρωση, απόκρυψη, μεταφορά ή αντικατάσταση των διάσπαρτων κλιματιστικών μονάδων. Ως πιθανές θέσεις αναφέρθηκαν λιγότερο ορατά σημεία, ακόμη και το δώμα, ή η ένταξή τους σε μορφολογικά συμβατές κατασκευές. Η παρέμβαση είχε κυρίως στόχο την αποκατάσταση της οπτικής συνοχής της λιθοδομής, ενώ το μοντέλο ανέφερε και πιθανή αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Η εφαρμογή της εξαρτήθηκε από ηλεκτρομηχανολογική μελέτη των ισχύων, των νέων θέσεων, των σωληνώσεων και των απαιτήσεων λειτουργίας.

Η πέμπτη παρέμβαση περιλάμβανε την ενσωμάτωση των πλεγμάτων ασφαλείας σε νέα ή ανασχεδιασμένα ξύλινα κουφώματα. Στόχος ήταν η διατήρηση της προστασίας από βανδαλισμούς και διαρρήξεις, με μικρότερη οπτική αλλοίωση των ανοιγμάτων και περιορισμό των εμποδίων στον φυσικό φωτισμό. Το Gemini αναγνώρισε ότι η λύση θα έπρεπε να παρέχει ισοδύναμο επίπεδο ασφάλειας και να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις σχολικού κτιρίου.

6.4.3 Διαφοροποίηση των δύο σεναρίων

Το Gemini διαφοροποίησε με σαφήνεια τα δύο σενάρια ως προς την κλίμακα, τον χρόνο εφαρμογής και τον αρχιτεκτονικό τους αντίκτυπο. Το Σενάριο G2A επικεντρώθηκε σε επισκευές, καθαρισμούς, εσωτερικές προσθήκες και περιορισμένες μεταβολές. Το

Σενάριο G2B περιλάμβανε εργασίες μεγαλύτερης κλίμακας, όπως η εγκατάσταση νέων εξωτερικών παντζουριών, η αποκατάσταση των βόρειων ανοιγμάτων, η αναμόρφωση της αυλής και η αναδιοργάνωση των κλιματιστικών και των πλεγμάτων.

Σύμφωνα με την ίδια την απάντηση του μοντέλου, το ελάχιστο σενάριο εξυπηρετούσε καλύτερα την άμεση βελτίωση των συνθηκών, τη διατήρηση του κελύφους και τον περιορισμό των τεχνικών και διοικητικών απαιτήσεων. Αντίθετα, το ολοκληρωμένο σενάριο θεωρήθηκε καταλληλότερο για την αντιμετώπιση της ηλιακής επιβάρυνσης του ορόφου, του μικροκλίματος της αυλής, της αποσπασματικής τοποθέτησης των κλιματιστικών και της πλήρους αποκατάστασης του διαμπερούς αερισμού.

Παρότι η διάκριση μεταξύ των δύο σεναρίων είναι γενικά σαφής, ορισμένες προτάσεις παρουσιάζουν εσωτερικές ασυνέπειες ως προς την αρχική τους κατηγοριοποίηση. Η απομάκρυνση της ασφάλτου στο Σενάριο G2A υπερβαίνει σε κάποιο βαθμό τη λογική μιας πλήρως αναστρέψιμης παρέμβασης. Αντίστοιχα, στο Σενάριο G2B η μεταφορά των κλιματιστικών στο δώμα και ο ανασχεδιασμός των πλεγμάτων αποτελούν σύνθετες λύσεις, των οποίων η τεχνική και μορφολογική καταλληλότητα δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί χωρίς αναλυτικότερη μελέτη.

6.5 Συγκριτική ανάλυση των προτεινόμενων παρεμβάσεων

Η συγκριτική ανάλυση των τεσσάρων σεναρίων δείχνει ότι το ChatGPT και το Gemini κινήθηκαν σε κοινούς θεματικούς άξονες, αλλά διαφοροποιήθηκαν ως προς τον βαθμό τεχνικής εξειδίκευσης, την έκταση των προτεινόμενων μεταβολών και τον τρόπο διαχείρισης των ελλিপών δεδομένων. Και τα δύο μοντέλα επικεντρώθηκαν στην ηλιοπροστασία, στον φυσικό αερισμό, στα ξύλινα κουφώματα, στη λειτουργία των μηχανικών συστημάτων ψύξης και στη σχέση της νότιας όψης με τον αύλειο χώρο. Ωστόσο, το ChatGPT ακολούθησε περισσότερο σταδιακή και διερευνητική προσέγγιση, ενώ το Gemini πρότεινε συχνότερα συγκεκριμένες κατασκευαστικές λύσεις και παρεμβάσεις αποκατάστασης της μορφής του κτιρίου.

Πεδίο	ChatGPT- Σενάριο A	Gemini- Σενάριο A	ChatGPT- Σενάριο B	Gemini- Σενάριο B
Ηλιοπροστασία	Συντήρηση και	Επαναλειτουργία	Νέο εξωτερικό	Νέα ξύλινα

Πεδίο	ChatGPT- Σενάριο Α	Gemini- Σενάριο Α	ChatGPT- Σενάριο Β	Gemini- Σενάριο Β
	οργανωμένη χρήση κουρτινών, σκιάστρων και παντζουριών	παντζουριών και αντικατάσταση κουρτινών	σύστημα ανά ομάδα ανοιγμάτων	παντζούρια στον όροφο και στα ανοίγματα χωρίς προστασία
Κουφώματα	Συντήρηση και λειτουργική ρύθμιση	Δεν αποτελεί αυτοτελή γενική παρέμβαση	Αποκατάσταση και πιθανή εσωτερική αναβάθμιση των υαλοπινάκων	Νέα ή ανασχεδιασμένα κουφώματα σε συνδυασμό με τα πλέγματα
Φυσικός αερισμός	Έλεγχος και επιλεκτική επαναλειτουργία υφιστάμενων διαδρομών	Καθαρισμός και διάνοιξη των οπών, συντήρηση ανεμιστήρων	Οργανωμένο φυσικό και υποβοηθούμενο σύστημα μεταξύ νότιας και βόρειας πλευράς	Αποκατάσταση των κλεισμένων βόρειων υαλοστασίων
Κλιματισμός	Συντήρηση, καταγραφή και καλύτερος συντονισμός	Δεν περιλαμβάνεται αυτοτελώς	Αναδιοργάνωση μετά τη μείωση των θερμικών φορτίων	Συγκέντρωση, μεταφορά, απόκρυψη ή αντικατάσταση μονάδων
Αύλειος χώρος	Πιλοτική και αναστρέψιμη ενίσχυση σκίασης και φύτευσης	Τοπική αφαίρεση ασφάλτου και δημιουργία ζωνών φύτευσης	Μερική βιοκλιματική αναδιαμόρφωση	Συνολική αντικατάσταση σκληρών υλικών και ενίσχυση πρασίνου
Μορφολογική προστασία	Διατήρηση της υφιστάμενης μορφής και	Επαναλειτουργία αυθεντικών στοιχείων	Νέα στοιχεία προσαρμοσμένα στον ρυθμό των	Αποκατάσταση της όψης και ενσωμάτωση

Πεδίο	ChatGPT- Σενάριο Α	Gemini- Σενάριο Α	ChatGPT- Σενάριο Β	Gemini- Σενάριο Β
	περιορισμός νέων στοιχείων		ανοιγμάτων	μεταγενέστερων προσθηκών

Πίνακας 9 Συγκριτική αποτύπωση των βασικών πεδίων παρέμβασης

6.5.1 Κοινά σημεία των τεσσάρων σεναρίων

Βασικό κοινό στοιχείο αποτέλεσε η αναγνώριση ότι η νότια ζώνη δεν πρέπει να αντιμετωπιστεί μόνο ως πρόβλημα θερμικής προστασίας. Οι προτάσεις συνέδεσαν την ηλιοπροστασία με τον φυσικό φωτισμό, τον αερισμό, τη χρήση των κλιματιστικών και τις συνθήκες στον αύλειο χώρο.

Και τα δύο μοντέλα απέφυγαν να προτείνουν εξωτερική θερμομόνωση της λιθοδομής ή γενικευμένη αντικατάσταση των χαρακτηριστικών ξύλινων κουφωμάτων. Αντίθετα, έδωσαν έμφαση στη διατήρηση της εξωτερικής μορφής, του ρυθμού των ανοιγμάτων και των αυθεντικών ή μορφολογικά χαρακτηριστικών στοιχείων.

Παράλληλα, και οι δύο προσεγγίσεις αναγνώρισαν ότι η αποκατάσταση του φυσικού αερισμού πρέπει να εξετάσει τόσο τη νότια όσο και τη βόρεια πλευρά του κτιρίου. Η καταγραφή των κλεισμένων οπών και υαλοστασίων αποτέλεσε τη βάση για προτάσεις επαναλειτουργίας της αρχικής διαδρομής του αέρα. Η διαφορά εντοπίστηκε κυρίως στον βαθμό βεβαιότητας και στην έκταση της προτεινόμενης παρέμβασης.

Τέλος, και τα δύο μοντέλα ενέταξαν τον αύλειο χώρο στη βιοκλιματική λειτουργία της νότιας ζώνης. Οι σκληρές επιφάνειες και η περιορισμένη φύτευση αντιμετωπίστηκαν ως πιθανοί παράγοντες θερμικής επιβάρυνσης, με διαφορετική όμως ένταση και κλίμακα παρέμβασης.

6.5.2 Σύγκριση των σεναρίων ελάχιστης παρέμβασης

Τα δύο ελάχιστα σεναρία παρουσιάζουν κοινή έμφαση στην αξιοποίηση των υφιστάμενων στοιχείων. Και τα δύο προτείνουν την επαναφορά της λειτουργίας των ξύλινων παντζουριών, τον έλεγχο των μέσων εσωτερικής σκίασης και τη διερεύνηση των υφιστάμενων στοιχείων αερισμού.

Το ChatGPTοργάνωσε το Σενάριο C2A γύρω από τη διαδοχή καταγραφή - έλεγχος - συντήρηση - επιλεκτική εφαρμογή. Δεν θεώρησε δεδομένο ότι τα υφιστάμενα στοιχεία

είναι τεχνικά κατάλληλα ή λειτουργικά. Για παράδειγμα, πριν από την επαναλειτουργία των οπών αερισμού πρότεινε μη καταστροφικό έλεγχο της συνέχειάς τους, ενώ πριν από οποιαδήποτε επέμβαση στα κουφώματα πρότεινε αποτύπωση της κατάστασης κάθε ανοίγματος. Το σενάριο χαρακτηρίστηκε από το ίδιο το μοντέλο ως συντηρητικό, αναστρέψιμο και χαμηλής κατασκευαστικής όχλησης.

Το Gemini πρότεινε περισσότερο άμεσες ενέργειες. Η αντικατάσταση των κουρτινών με υλικά υψηλής ανακλαστικότητας, η διάνοιξη των οπών αερισμού και η τοπική απομάκρυνση της ασφάλτου παρουσιάστηκαν ως συγκεκριμένες παρεμβάσεις και όχι μόνο ως αντικείμενα διερεύνησης.

Η σημαντικότερη διαφορά αφορά τον αύλειο χώρο. Το ChatGPT πρότεινε κινητά ή εύκολα αφαιρούμενα στοιχεία σκίασης και περιορισμένη πιλοτική φύτευση, ώστε να διατηρείται η αναστρεψιμότητα. Αντίθετα, το Gemini πρότεινε αφαίρεση τμήματος της ασφάλτου και δημιουργία φυτεμένων ζωνών. Η δεύτερη λύση μπορεί να έχει μεγαλύτερο μικροκλιματικό αποτέλεσμα, αλλά προϋποθέτει κατασκευαστικές εργασίες, έλεγχο των υποδομών και μεταβολή της υφιστάμενης επιφάνειας. Κατά συνέπεια, δεν ανταποκρίνεται στον ίδιο βαθμό στην έννοια της άμεσα αναστρέψιμης παρέμβασης.

Διαφορά παρατηρείται και ως προς τα κλιματιστικά. Το ChatGPT περιέλαβε τη συντήρηση και τη συντονισμένη λειτουργία τους στο ελάχιστο σενάριο, συνδέοντας την ενεργητική ψύξη με τη σκίαση και τον αερισμό. Αντίθετα, το Gemini εστίασε στους ανεμιστήρες των υαλοστασίων και δεν περιέλαβε αντίστοιχη αυτοτελή παρέμβαση για τα κλιματιστικά στο Σενάριο G2A.

Συνολικά, το ελάχιστο σενάριο του ChatGPT εμφανίζει μεγαλύτερη εσωτερική συνέπεια ως προς τον περιορισμένο και διερευνητικό χαρακτήρα του. Το σενάριο του Gemini είναι περισσότερο συγκεκριμένο και άμεσα κατασκευαστικό, αλλά περιλαμβάνει λύσεις διαφορετικού βαθμού πολυπλοκότητας.

6.5.3 Σύγκριση των ολοκληρωμένων σεναρίων

Στα ολοκληρωμένα σενάρια η απόσταση μεταξύ των δύο μοντέλων γίνεται περισσότερο εμφανής. Το ChatGPT υιοθέτησε συστημική προσέγγιση, ενώ το Gemini πρότεινε περισσότερο σαφείς και αυτοτελείς κατασκευαστικές επεμβάσεις.

Το Σενάριο C2B οργανώθηκε γύρω από την αλληλεπίδραση της ηλιοπροστασίας, του φυσικού φωτισμού, της αεροστεγανότητας, του αερισμού, της ψύξης και του αύλειου μικροκλίματος. Το μοντέλο τόνισε ότι η βελτίωση ενός πεδίου δεν πρέπει να υποβαθμίζει κάποιο άλλο. Για παράδειγμα, το εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας πρέπει να περιορίζει τη θερινή ακτινοβολία χωρίς να μειώνει υπερβολικά το διάχυτο φως, ενώ η αναβάθμιση της αεροστεγανότητας δεν πρέπει να καταργεί τη δυνατότητα ελεγχόμενου αερισμού.

Αντίθετα, το Σενάριο G2B οργανώθηκε γύρω από συγκεκριμένα κατασκευαστικά αντικείμενα: νέα ξύλινα παντζούρια, αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων, αντικατάσταση των υλικών της αυλής, μετακίνηση των κλιματιστικών και ενσωμάτωση των πλεγμάτων στα κουφώματα. Η προσέγγιση ήταν περισσότερο άμεσα σχεδιαστική και προσανατολισμένη στη μορφολογική αναδιοργάνωση της όψης.

Στην ηλιοπροστασία, το ChatGPT πρότεινε ένα νέο σύστημα που θα σχεδιαζόταν ανά ομάδα ανοιγμάτων, χωρίς να προσδιορίσει εκ των προτέρων το υλικό ή την ακριβή του μορφή. Η γεωμετρία του θα προέκυπτε από ηλιακή και φωτομετρική μελέτη. Το Gemini πρότεινε συγκεκριμένα νέα ξύλινα παντζούρια, βασισμένα στη μορφή των υφιστάμενων του ισογείου.

Η πρόταση του Gemini εμφανίζει μορφολογική σαφήνεια, αλλά στηρίζεται στην υπόθεση ότι η επέκταση του συγκεκριμένου τύπου παντζουριού στον όροφο είναι ιστορικά και αρχιτεκτονικά συμβατή. Αντίθετα, η πρόταση του ChatGPT παραμένει πιο ανοικτή ως προς το τελικό σύστημα, αλλά απαιτεί περισσότερο σύνθετη μελέτη για την ένταξή του.

Στα κουφώματα, το ChatGPT έδωσε έμφαση στη διατήρηση και στην αποκατάσταση των ξύλινων πλαισίων, εξετάζοντας ακόμη και τη δυνατότητα δευτερεύοντος εσωτερικού υαλοστασίου. Το Gemini συνέδεσε την αναβάθμιση των κουφωμάτων κυρίως με την ενσωμάτωση των πλεγμάτων ασφαλείας. Η δεύτερη πρόταση επιδιώκει μορφολογική ενοποίηση, αλλά αποτελεί περισσότερο εκτεταμένη μεταβολή και προϋποθέτει επιβεβαίωση ότι τα υφιστάμενα κουφώματα μπορούν ή πρέπει να αντικατασταθούν.

Στον αερισμό, και τα δύο μοντέλα πρότειναν αποκατάσταση της σχέσης μεταξύ νότιας και βόρειας πλευράς. Το ChatGPT εξέτασε το σύστημα ως συνδυασμό φυσικού και υποβοηθούμενου αερισμού, με μέτρηση παροχών, CO₂, θορύβου και εξωτερικών

συνθηκών. Το Gemini επικεντρώθηκε στην αποκατάσταση των κλεισμένων βόρειων υαλοστασίων και στην τοποθέτηση νέων ανοιγόμενων πλαισίων. Η πρόταση του Gemini είναι πιο συγκεκριμένη, αλλά το ChatGPT περιγράφει πληρέστερα τη λειτουργική και περιβαλλοντική αξιολόγηση που πρέπει να προηγηθεί.

Στην ενεργητική ψύξη, το ChatGPT πρότεινε αναδιοργάνωση μετά τον περιορισμό των θερμικών φορτίων και τον επανυπολογισμό των ψυκτικών αναγκών. Το Gemini πρότεινε συγκέντρωση, απόκρυψη, μεταφορά ή αντικατάσταση των μονάδων, αναφέροντας ακόμη και το δώμα ως πιθανή νέα θέση. Η προσέγγιση του Gemini δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην εικόνα της όψης, ενώ το ChatGPT συνδέει περισσότερο την αναδιοργάνωση με τη συνολική ενεργειακή λειτουργία.

6.5.4 Διαφοροποίηση ως προς τον αύλειο χώρο

Και στα δύο επίπεδα παρέμβασης, το Gemini πρότεινε περισσότερο εκτεταμένες αλλαγές στην αυλή. Στο ελάχιστο σενάριο προβλέφθηκε τοπική απομάκρυνση της ασφάλτου, ενώ στο ολοκληρωμένο σενάριο συνολική αντικατάσταση των σκληρών επιφανειών με ψυχρά ή διαπερατά υλικά και ενίσχυση της φύτευσης.

Το ChatGPT διατήρησε πιο περιορισμένη χωρική οριοθέτηση. Στο ελάχιστο σενάριο πρότεινε πιλοτικές και αναστρέψιμες λύσεις, ενώ στο ολοκληρωμένο σενάριο αναφέρθηκε σε μερική αναδιαμόρφωση μόνο του χώρου που συνδέεται άμεσα με τη νότια όψη. Η προσέγγιση αυτή συμφωνεί περισσότερο με την αρχική οριοθέτηση της έρευνας, η οποία δεν αφορά το σύνολο του σχολικού συγκροτήματος και της αυλής.

Η συνολική αντικατάσταση της ασφάλτου που πρότεινε το Gemini διευρύνει ουσιαστικά το πεδίο της παρέμβασης. Παράλληλα, η χρήση του όρου «τοπική αστική θερμική νησίδα» εμφανίζεται περισσότερο κατηγορηματική από ό,τι επιτρέπουν οι διαθέσιμες μετρήσεις. Η ύπαρξη σκληρών επιφανειών τεκμηριώνεται, αλλά η ακριβής μικροκλιματική τους επίδραση δεν έχει ποσοτικοποιηθεί.

6.5.5 Χρήση των διαθέσιμων δεδομένων και διαχείριση της αβεβαιότητας

Το ChatGPT συνέδεσε συστηματικά τις προτάσεις του με την ανάγκη πρόσθετης τεκμηρίωσης. Οι παρεμβάσεις του συνοδεύτηκαν από ελέγχους κατάστασης, αυτοψίες,

μετρήσεις και ειδικές μελέτες. Η τελική μορφή των λύσεων παρέμεινε σκόπιμα ανοικτή όταν δεν υπήρχαν επαρκή στοιχεία.

Το Gemini κατέγραψε επίσης τις απαιτούμενες τεχνικές μελέτες, αλλά προχώρησε συχνότερα στην επιλογή συγκεκριμένης λύσης πριν από την ολοκλήρωση των ελέγχων. Για παράδειγμα, πρότεινε παντζούρια συγκεκριμένου υλικού, μεταφορά των κλιματιστικών, αποξήλωση ασφάλτου και νέα ανοιγόμενα πλαίσια. Οι προτάσεις αυτές είναι περισσότερο εύκολα αναγνώσιμες ως αρχιτεκτονικές λύσεις, αλλά ενσωματώνουν περισσότερες παραδοχές σχετικά με τη στατική δυνατότητα, την αρχική μορφή, την κατάσταση των στοιχείων και το θεσμικό καθεστώς του κτιρίου.

Παράλληλα, το ChatGPT έδωσε μεγαλύτερη έμφαση στον πιλοτικό χαρακτήρα των παρεμβάσεων. Η εφαρμογή σε περιορισμένη κλίμακα αντιμετωπίστηκε ως μέσο συλλογής δεδομένων πριν από μια γενικευμένη μεταβολή. Το Gemini εστίασε περισσότερο στην άμεση επίλυση και στη μορφολογική αποκατάσταση.

6.5.6 Συνολική συγκριτική αποτίμηση

Η σύγκριση δείχνει ότι τα δύο μοντέλα δεν παρήγαγαν πλήρως διαφορετικές κατευθύνσεις. Αντίθετα, συνέκλιναν στους βασικούς άξονες της βιοκλιματικής αναβάθμισης, γεγονός που υποδηλώνει ότι το κοινό πληροφοριακό πακέτο και τα prompts οδήγησαν σε θεματικά συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Η ουσιαστική διαφοροποίηση αφορά τον τρόπο με τον οποίο κάθε μοντέλο μετέτρεψε τα διαθέσιμα δεδομένα σε σχεδιαστικές προτάσεις:

- Το ChatGPT ακολούθησε περισσότερο σταδιακή, συστημική και υπό όρους προσέγγιση. Έδωσε έμφαση στην καταγραφή, στη συντήρηση, στην πιλοτική εφαρμογή και στη διασύνδεση των διαφορετικών περιβαλλοντικών παραμέτρων.
- Το Gemini ακολούθησε περισσότερο συγκεκριμένη, κατασκευαστική και μορφολογικά προσανατολισμένη προσέγγιση. Πρότεινε σαφέστερα αντικείμενα σχεδιασμού και απέδωσε ιδιαίτερη σημασία στην αποκατάσταση της εικόνας του κτιρίου.

Η μεγαλύτερη συγκεκριμενοποίηση των προτάσεων του Gemini αποτελεί πλεονέκτημα ως προς την άμεση κατανόηση του σχεδιαστικού αποτελέσματος, αλλά αυξάνει την εξάρτησή τους από μη επιβεβαιωμένες παραδοχές. Αντίστοιχα, η επιφυλακτική προσέγγιση του ChatGPT περιορίζει τον κίνδυνο ατεκμηρίωτων λύσεων, αλλά οδηγεί ορισμένες φορές σε περισσότερο γενικές κατευθύνσεις που απαιτούν σημαντική περαιτέρω επεξεργασία για να μετατραπούν σε συγκεκριμένο αρχιτεκτονικό σχέδιο.

6.6 Αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων

Μετά την περιγραφική και συγκριτική παρουσίαση των προτάσεων εφαρμόστηκε το πλαίσιο αξιολόγησης που ορίστηκε στο μεθοδολογικό κεφάλαιο. Η αξιολόγηση αφορά τα τέσσερα σενάρια ως ενιαίες σχεδιαστικές προσεγγίσεις και όχι μόνο την τεχνική ποιότητα μεμονωμένων παρεμβάσεων.

Τα σενάρια αξιολογήθηκαν με βάση πέντε ισοβαρή κριτήρια:

1. αξιοποίηση του διαθέσιμου πληροφοριακού υλικού,
2. βιοκλιματική καταλληλότητα,
3. τεχνική εφαρμοσιμότητα,
4. αρχιτεκτονική συμβατότητα,
5. τεκμηρίωση και αναγνώριση των περιορισμών.

Για κάθε κριτήριο χρησιμοποιήθηκε κλίμακα από 1 έως 5, όπου ο βαθμός 1 δηλώνει πολύ περιορισμένη κάλυψη του κριτηρίου, ο βαθμός 3 μερική ή μέτρια κάλυψη και ο βαθμός 5 ιδιαίτερα υψηλή κάλυψη. Η μέγιστη συνολική βαθμολογία κάθε σεναρίου είναι 25 βαθμοί.

Η αξιολόγηση έχει συγκριτικό και προκαταρκτικό χαρακτήρα. Δεν αποτελεί πιστοποίηση της τεχνικής καταλληλότητας των προτάσεων ούτε υποκαθιστά την αυτοψία, τις μετρήσεις και τις απαιτούμενες ειδικές μελέτες. Επιπλέον, μία υψηλότερη συνολική βαθμολογία δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι το αντίστοιχο σενάριο θα προσέφερε το μεγαλύτερο ενεργειακό ή περιβαλλοντικό όφελος. Αντανακλά τον βαθμό στον οποίο το

ένα ανταποκρίνεται συνολικά στα πέντε κριτήρια με βάση τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα στο παρόν στάδιο.

6.6.1 Συγκεντρωτική βαθμολόγηση

Κριτήριο	C2A: ChatGPT- Ελάχιστο	C2B: ChatGPT- Ολοκληρωμένο	G2A: Gemini- Ελάχιστο	G2B: Gemini- Ολοκληρωμένο
Αξιοποίηση διαθέσιμου υλικού	5	5	4	4
Βιοκλιματική καταλληλότητα	4	5	4	4
Τεχνική εφαρμοσιμότητα	4	3	4	3
Αρχιτεκτονική συμβατότητα	5	4	4	3
Τεκμηρίωση και αναγνώριση περιορισμών	5	5	3	3
Συνολική βαθμολογία	23/25	22/25	19/25	17/25

Πίνακας 10 Συγκεντρωτική αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων

Η υψηλότερη συνολική βαθμολογία αποδόθηκε στο ελάχιστο σενάριο του ChatGPT, με 23/25 βαθμούς. Ακολούθησε το ολοκληρωμένο σενάριο του ίδιου μοντέλου με 22/25 βαθμούς. Τα δύο σενάρια του Gemini συγκέντρωσαν 19/25 και 17/25 βαθμούς αντίστοιχα.

Η μικρή υπεροχή του C2A έναντι του C2B δεν σημαίνει ότι το ελάχιστο σενάριο έχει μεγαλύτερη δυνητική βιοκλιματική απόδοση. Προκύπτει κυρίως από την υψηλότερη τεχνική εφαρμοσιμότητα, την αναστρεψιμότητα και τον περιορισμένο κίνδυνο μορφολογικής αλλοίωσης. Αντίθετα, το C2B αντιμετωπίζει πληρέστερα τα

περιβαλλοντικά προβλήματα, αλλά εξαρτάται από περισσότερες τεχνικές, στατικές, ενεργειακές και μικροκλιματικές μελέτες.

Αξιολόγηση του C2A

Το ελάχιστο σενάριο του ChatGPT αξιοποίησε συστηματικά το κοινό πληροφοριακό πακέτο. Οι προτάσεις του συνδέθηκαν άμεσα με τις κουρτίνες, τα παντζούρια, τα ξύλινα κουφώματα, τις γρίλιες, τους ανεμιστήρες, τις κλιματιστικές μονάδες και τις σκληρές επιφάνειες της αυλής. Το μοντέλο δεν περιορίστηκε σε γενικές κατευθύνσεις εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά προσαρμόστηκε στα συγκεκριμένα στοιχεία του κτιρίου. Για τον λόγο αυτό αποδόθηκε βαθμός 5 στην αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού.

Ως προς τη βιοκλιματική καταλληλότητα, το σενάριο αντιμετωπίζει την ηλιοπροστασία, τον αερισμό, τη χρήση της ενεργητικής ψύξης και το μικροκλίμα της αυλής. Ωστόσο, οι παρεμβάσεις είναι σκόπιμα περιορισμένες και δεν αντιμετωπίζουν πλήρως την απουσία εξωτερικής σκίασης στον πρώτο όροφο ή τη συνολική θερμική συμπεριφορά του κελύφους. Κατά συνέπεια, αποδόθηκε βαθμός 4.

Η τεχνική εφαρμοσιμότητα αξιολογήθηκε επίσης με 4. Οι περισσότερες προτάσεις αφορούν εργασίες συντήρησης, λειτουργικής ρύθμισης και πιλοτικής εφαρμογής. Εντούτοις, η επαναλειτουργία των διαδρομών αερισμού δεν μπορεί να θεωρηθεί άμεσα εφαρμόσιμη πριν επιβεβαιωθούν η συνέχεια, η κατάσταση και η ασφάλειά τους. Αντίστοιχα, ακόμη και η περιορισμένη επέμβαση στον αύλειο χώρο απαιτεί τοπογραφικό, έλεγχο υποδομών και διερεύνηση της σχολικής κυκλοφορίας.

Στην αρχιτεκτονική συμβατότητα αποδόθηκε βαθμός 5. Το σενάριο βασίζεται στη διατήρηση και στην επαναλειτουργία των υφιστάμενων στοιχείων, αποφεύγει νέες εκτεταμένες προσθήκες στη λιθοδομή και διατηρεί τα πλέγματα ασφαλείας, εκτός εάν προβλεφθεί ισοδύναμη λύση. Η αναστρεψιμότητα αποτελεί σταθερή αρχή των προτάσεων.

Τέλος, η τεκμηρίωση και η αναγνώριση των περιορισμών αξιολογήθηκαν με 5. Το μοντέλο διέκρινε συστηματικά τις τεκμηριωμένες παρατηρήσεις από τις υποθέσεις και απέφυγε ποσοτικούς ισχυρισμούς για ενεργειακή εξοικονόμηση ή θερμική βελτίωση. Για

κάθε παρέμβαση κατέγραψε τα πρόσθετα δεδομένα και τους τεχνικούς ελέγχους που απαιτούνταν.

Αξιολόγηση του C2B

Το ολοκληρωμένο σενάριο του ChatGPT έλαβε επίσης βαθμό 5 ως προς την αξιοποίηση του υλικού. Οι παρεμβάσεις συνδέθηκαν με τη διάταξη των ανοιγμάτων, τα υφιστάμενα κουφώματα, τις νότιες και βόρειες διαδρομές αερισμού, τις εγκαταστάσεις ψύξης και τον άμεσα γειτονικό αύλειο χώρο.

Στη βιοκλιματική καταλληλότητα αποδόθηκε βαθμός 5. Το σενάριο αντιμετωπίζει τη νότια ζώνη ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα και εξετάζει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλιοπροστασίας, φωτισμού, αεροστεγανότητας, αερισμού, ψύξης και υπαίθριου μικροκλίματος. Ιδιαίτερα θετική είναι η επισημάνση ότι η σκίαση δεν πρέπει να μειώνει υπερβολικά τον φυσικό φωτισμό και ότι η βελτίωση της αεροστεγανότητας δεν πρέπει να καταργεί τον ελεγχόμενο αερισμό.

Η τεχνική εφαρμοσιμότητα βαθμολογήθηκε με 3. Παρότι οι προτάσεις είναι τεχνικά εύλογες ως κατευθύνσεις, η εφαρμογή τους εξαρτάται από εκτεταμένες μελέτες. Το νέο σύστημα ηλιοπροστασίας απαιτεί ηλιακή και στατική μελέτη, η πιθανή προσθήκη εσωτερικού υαλοστασίου απαιτεί υδροθερμικό έλεγχο, η αποκατάσταση του αερισμού απαιτεί μετρήσεις παροχών και ποιότητας αέρα, ενώ η αναδιοργάνωση των κλιματιστικών απαιτεί πλήρη ηλεκτρομηχανολογική αξιολόγηση.

Η αρχιτεκτονική συμβατότητα έλαβε βαθμό 4. Το μοντέλο έθεσε σαφείς περιορισμούς για την προστασία της λιθοδομής, του ρυθμού των ανοιγμάτων, των ξύλινων κουφωμάτων, του προπύλου και του εξώστη. Ωστόσο, η εισαγωγή νέου εξωτερικού συστήματος σκίασης και η πιθανή συγκέντρωση ή κάλυψη των εξωτερικών μονάδων μπορούν να επηρεάσουν αισθητά την όψη. Η τελική συμβατότητα δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί χωρίς σχεδιαστική εξειδίκευση.

Η τεκμηρίωση και η αναγνώριση των περιορισμών βαθμολογήθηκαν με 5. Οι προτάσεις συνοδεύτηκαν από εκτενή καταγραφή των αναγκαίων μετρήσεων, των στατικών, λειτουργικών και θεσμικών περιορισμών και των πιθανών κινδύνων. Το μοντέλο απέφυγε να παρουσιάσει τις λύσεις ως έτοιμες προς εφαρμογή.

Αξιολόγηση του G2A

Το ελάχιστο σενάριο του Gemini έλαβε βαθμό 4 στην αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού. Οι προτάσεις του συνδέθηκαν με συγκεκριμένα στοιχεία του κτιρίου, όπως τα ξύλινα παντζούρια, οι κουρτίνες, οι οπές αερισμού, οι ανεμιστήρες και η ασφάλτος της αυλής. Ωστόσο, η σύνδεση των προτάσεων με τις πραγματικές συνθήκες και με τα ελλείποντα δεδομένα δεν αναπτύχθηκε με την ίδια συστηματικότητα όπως στα σενάρια του ChatGPT.

Η βιοκλιματική καταλληλότητα αξιολογήθηκε με 4. Το σενάριο αντιμετωπίζει την εξωτερική και εσωτερική σκίαση, τον αερισμό, τη λειτουργία των ανεμιστήρων και τη μικροκλιματική σχέση της όψης με την αυλή. Δεν περιλαμβάνει, όμως, αυτοτελή παρέμβαση για την καταγραφή και τη διαχείριση των κλιματιστικών, ενώ ορισμένα αναμενόμενα οφέλη, όπως η τοπική μείωση της θερμοκρασίας του αέρα από την περιορισμένη αφαίρεση της ασφάλτου, διατυπώνονται χωρίς να είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν.

Στην τεχνική εφαρμοσιμότητα αποδόθηκε βαθμός 4. Η συντήρηση των παντζουριών, η αντικατάσταση των κουρτινών και ο έλεγχος των ανεμιστήρων είναι σχετικά άμεσες παρεμβάσεις. Αντίθετα, η διάνοιξη των οπών αερισμού και η απομάκρυνση της ασφάλτου απαιτούν περισσότερους ελέγχους από όσους υποδηλώνει ο χαρακτηρισμός του σεναρίου ως άμεσα εφαρμόσιμου.

Η αρχιτεκτονική συμβατότητα βαθμολογήθηκε με 4. Οι περισσότερες παρεμβάσεις διατηρούν την εξωτερική μορφή ή επαναφέρουν τη λειτουργία αυθεντικών στοιχείων. Παρ' όλα αυτά, η προσθήκη εσωτερικών περσίδων στις οπές και η επέμβαση στη βάση της λιθόκτιστης όψης χρειάζονται προσεκτικότερο τεχνικό και μορφολογικό έλεγχο.

Η τεκμηρίωση και η αναγνώριση των περιορισμών έλαβαν βαθμό 3. Το Gemini ανέφερε την ανάγκη αυτοψίας, μετρήσεων φωτισμού, ελέγχου δικτύων και ηλεκτρολογικής ασφάλειας. Ωστόσο, διατύπωσε ορισμένα συμπεράσματα ως επιβεβαιωμένα προβλήματα, όπως την ανεπάρκεια του αερισμού και τη μικροκλιματική επιβάρυνση της ασφάλτου, χωρίς να υπάρχουν αντίστοιχες μετρήσεις. Επίσης, πέρασε γρηγορότερα από τη διάγνωση στην επιλογή συγκεκριμένης λύσης.

Αξιολόγηση του G2B

Το ολοκληρωμένο σενάριο του Gemini βαθμολογήθηκε με 4 ως προς την αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού. Τα νέα παντζούρια, η αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων, η αλλαγή της αυλής και η αναδιοργάνωση των εξωτερικών μονάδων συνδέονται με στοιχεία που καταγράφονται στο πληροφοριακό πακέτο. Ωστόσο, το μοντέλο υιοθέτησε επιπλέον παραδοχές σχετικά με την αρχική μορφή και την καταλληλότητα ορισμένων λύσεων.

Η βιοκλιματική καταλληλότητα αξιολογήθηκε με 4. Το σενάριο καλύπτει την εξωτερική ηλιοπροστασία, τον φυσικό αερισμό, το μικροκλίμα της αυλής και τη λειτουργία των συστημάτων ψύξης. Οι προτάσεις του θα μπορούσαν να έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος, αλλά δεν αναπτύσσονται πλήρως οι πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ σκίασης και φωτισμού, αερισμού και ακουστικής άνεσης ή νέων επιστρώσεων και απορροής των ομβρίων.

Η τεχνική εφαρμοσιμότητα έλαβε βαθμό 3. Η προσθήκη νέων παντζουριών απαιτεί στατικό και μορφολογικό έλεγχο, η επαναφορά των βόρειων υαλοστασίων προϋποθέτει επιβεβαίωση της αρχικής και της σημερινής κατασκευής, ενώ η συνολική αντικατάσταση των υλικών της αυλής απαιτεί πλήρη τοπογραφική, υδραυλική και μικροκλιματική μελέτη. Η μεταφορά των κλιματιστικών στο δώμα ή σε άλλες θέσεις δεν μπορεί να θεωρηθεί τεχνικά κατάλληλη χωρίς έλεγχο των αποστάσεων, των δικτύων, του θορύβου και της συντήρησης.

Η αρχιτεκτονική συμβατότητα βαθμολογήθηκε με 3. Το Gemini επιδιώκει ρητά τη μορφολογική αποκατάσταση της όψης και προτείνει χρήση ξύλινων στοιχείων που θα αναφέρονται στα υφιστάμενα πρότυπα. Ωστόσο, δεν τεκμηριώνεται ότι η προσθήκη παντζουριών στον όροφο αντιστοιχεί στην αρχική μορφή του κτιρίου. Αντίστοιχα, η ενσωμάτωση των πλεγμάτων σε νέα κουφώματα προϋποθέτει σημαντική μεταβολή των υφιστάμενων ανοιγμάτων και ενδέχεται να επηρεάσει την αυθεντικότητά τους.

Τέλος, η τεκμηρίωση και η αναγνώριση των περιορισμών έλαβαν βαθμό 3. Παρότι αναφέρθηκαν στατικές, ηλεκτρομηχανολογικές και μικροκλιματικές μελέτες, το μοντέλο παρουσίασε αρκετές λύσεις με υψηλό βαθμό βεβαιότητας πριν επιβεβαιωθούν οι σχετικές προϋποθέσεις. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η πλήρης αποκατάσταση του

διαμπερούς αερισμού, η συνολική αποξήλωση της ασφάλτου και η πιθανή μεταφορά των κλιματιστικών στο δώμα.

6.6.2 Αξιολόγηση των επιμέρους παρεμβάσεων

Εκτός από τη συνολική βαθμολόγηση, κάθε παρέμβαση εξετάστηκε ως προς τη δυνατότητα εφαρμογής της με βάση τα σημερινά δεδομένα. Η κατηγορία «εφαρμόσιμη» δεν σημαίνει ότι η παρέμβαση μπορεί να υλοποιηθεί χωρίς τεχνικό έλεγχο. Δηλώνει ότι η βασική της κατεύθυνση είναι επαρκώς τεκμηριωμένη και δεν εμφανίζει εμφανές εμπόδιο εφαρμογής. Αντίστοιχα, η κατηγορία «μη αξιολογήσιμη» δεν σημαίνει ότι η πρόταση είναι απορριπτέα, αλλά ότι τα διαθέσιμα στοιχεία δεν επιτρέπουν ασφαλές συμπέρασμα.

Κωδικός	Παρέμβαση	Κατάταξη	Συνοπτική αιτιολόγηση
C2A-1	Συντήρηση και οργάνωση της υφιστάμενης ηλιοπροστασίας	Εφαρμόσιμη	Αφορά υφιστάμενα στοιχεία και δεν μεταβάλλει την όψη
C2A-2	Συντήρηση και ρύθμιση ξύλινων κουφωμάτων	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Η έκταση των εργασιών εξαρτάται από την κατάσταση κάθε κουφώματος
C2A-3	Επιλεκτική αποκατάσταση οπών και διαδρομών αερισμού	Μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα στοιχεία	Δεν είναι γνωστή η συνέχεια, η κατάσταση και η πραγματική λειτουργία των διαδρομών
C2A-4	Συντήρηση κλιματιστικών και περιορισμένη τακτοποίηση δικτύων	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Η συντήρηση είναι άμεσα εφικτή, αλλά η μεταβολή των δικτύων απαιτεί ηλεκτρομηχανολογικό έλεγχο
C2A-5	Πιλοτική σκίαση και φύτευση στην αυλή	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Απαιτεί χωρική οριοθέτηση και έλεγχο κυκλοφορίας, υποδομών και ασφάλειας
C2B-1	Νέο εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας	Μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα	Απαιτούνται ηλιακή, στατική, μορφολογική και θεσμική

Κωδικός	Παρέμβαση	Κατάταξη	Συνοπτική αιτιολόγηση
		στοιχεία	διερεύνηση
C2B-2	Αποκατάσταση κουφωμάτων και συμβατή αναβάθμιση υαλοπινάκων	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Η αποκατάσταση είναι εύλογη, αλλά το δευτερεύον υαλοστάσιο δεν είναι βέβαιο ότι μπορεί να εφαρμοστεί
C2B-3	Οργανωμένο φυσικό και υποβοηθούμενο σύστημα αερισμού	Μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα στοιχεία	Απουσιάζουν στοιχεία διαδρομών, παροχών, CO ₂ , θορύβου και πυρασφάλειας
C2B-4	Αναδιοργάνωση της ενεργητικής ψύξης	Μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα στοιχεία	Δεν είναι γνωστά τα φορτία, η ισχύς, η κατάσταση και η κατανάλωση των μονάδων
C2B-5	Μερική βιοκλιματική αναδιαμόρφωση της αυλής	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Είναι δυνατή ως κατεύθυνση, αλλά χρειάζεται ακριβής οριοθέτηση και μικροκλιματική μελέτη
G2A-1	Επαναλειτουργία υφιστάμενων παντζουριών	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Εξαρτάται από την κατάσταση της ξυλείας και των μηχανισμών
G2A-2	Κουρτίνες υψηλής ανακλαστικότητας	Εφαρμόσιμη	Πρόκειται για αναστρέψιμη εσωτερική παρέμβαση, μετά από έλεγχο φωτισμού και θάμβωσης
G2A-3	Καθαρισμός και διάνοιξη οπών αερισμού	Μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα στοιχεία	Δεν έχει επιβεβαιωθεί η πραγματική διαδρομή και η ασφαλής λειτουργία τους
G2A-4	Τοπική απομάκρυνση ασφάλτου και φύτευση	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Απαιτεί έλεγχο δικτύων, υγρασίας, απορροής και λειτουργίας της αυλής
G2A-5	Συντήρηση και ρύθμιση ανεμιστήρων	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Προϋποθέτει ηλεκτρολογικό, ακουστικό και λειτουργικό έλεγχο
G2B-1	Νέα ξύλινα παντζούρια	Μη αξιολογήσιμη	Δεν τεκμηριώνεται η ιστορική και

Κωδικός	Παρέμβαση	Κατάταξη	Συνοπτική αιτιολόγηση
	στον όροφο	με τα διαθέσιμα στοιχεία	στατική καταλληλότητα της προσθήκης
G2B-2	Αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων	Μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα στοιχεία	Απαιτείται αποτύπωση της αρχικής μορφής και πλήρης μελέτη αερισμού
G2B-3	Συνολική αντικατάσταση των σκληρών υλικών της αυλής	Μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα στοιχεία	Υπερβαίνει την άμεσα τεκμηριωμένη ζώνη και απαιτεί συνολική μελέτη της αυλής
G2B-4	Μεταφορά, απόκρυψη ή αντικατάσταση κλιματιστικών	Εφαρμόσιμη με τροποποιήσεις	Η μορφολογική τακτοποίηση είναι εύλογη, αλλά οι νέες θέσεις και η αντικατάσταση απαιτούν ηλεκτρομηχανολογική μελέτη
G2B-5	Ενσωμάτωση πλεγμάτων στα νέα κουφώματα	Μη αξιολογήσιμη με τα διαθέσιμα στοιχεία	Δεν τεκμηριώνονται η δυνατότητα αντικατάστασης των κουφωμάτων και η ισοδύναμη ασφάλεια

Πίνακας 11 Κατάταξη των επιμέρους παρεμβάσεων

Από την κατάταξη προκύπτει ότι οι περισσότεροι άμεσα εφαρμόσιμες παρεμβάσεις αφορούν τη συντήρηση και τη λειτουργική βελτίωση υφιστάμενων στοιχείων. Αντίθετα, οι προτάσεις που μεταβάλλουν την εξωτερική μορφή, επηρεάζουν τη λιθοδομή ή προϋποθέτουν συνολική αναδιοργάνωση εγκαταστάσεων και υπαίθριων επιφανειών παραμένουν μη αξιολογήσιμες χωρίς πρόσθετη τεκμηρίωση.

Καμία πρόταση δεν χαρακτηρίστηκε οριστικά μη εφαρμόσιμη. Η απουσία επαρκών δεδομένων δεν επιτρέπει την ασφαλή απόρριψη μιας παρέμβασης, όπως δεν επιτρέπει και την άμεση αποδοχή της. Η συγκεκριμένη στάση περιορίζει τον κίνδυνο να μετατραπεί η προκαταρκτική αξιολόγηση σε τελική τεχνική κρίση.

6.6.3 Συνολική αποτίμηση της αξιολόγησης

Η βαθμολόγηση επιβεβαιώνει τη διαφοροποίηση που είχε ήδη εντοπιστεί στη συγκριτική ανάλυση. Τα σενάρια του ChatGPT παρουσιάζουν μεγαλύτερη συνέπεια ως προς τη χρήση του υλικού, τη διαχείριση της αβεβαιότητας και την καταγραφή των τεχνικών περιορισμών. Το ολοκληρωμένο σενάριό του επιτυγχάνει την υψηλότερη βαθμολογία ως προς τη βιοκλιματική καταλληλότητα, επειδή εξετάζει συνδυαστικά τις περιβαλλοντικές παραμέτρους.

Το Gemini παρήγαγε πιο συγκεκριμένες και εύκολα οπτικοποιήσιμες προτάσεις. Η συγκεκριμενοποίηση αυτή ενίσχυσε τον σχεδιαστικό χαρακτήρα των αποτελεσμάτων, αλλά παράλληλα αύξησε την εξάρτησή τους από μη επιβεβαιωμένες παραδοχές. Η χαμηλότερη βαθμολογία του ολοκληρωμένου σεναρίου του δεν οφείλεται σε έλλειψη ιδεών, αλλά στον αυξημένο τεχνικό και μορφολογικό κίνδυνο των συγκεκριμένων λύσεων και στη μικρότερη έμφαση στη διάκριση μεταξύ δεδομένων και υποθέσεων.

Τέλος, η αξιολόγηση δείχνει ότι τα ελάχιστα και τα ολοκληρωμένα σενάρια δεν πρέπει να εξετάζονται μόνο ως ανταγωνιστικές επιλογές. Οι άμεσα εφαρμόσιμες εργασίες καταγραφής, συντήρησης και πιλοτικής εφαρμογής μπορούν να προηγηθούν και να παράσχουν τα δεδομένα που απαιτούνται για την αξιολόγηση των περισσότερο σύνθετων παρεμβάσεων. Έτσι, η σταδιακή προσέγγιση εμφανίζεται ως η ασφαλέστερη βάση για τη μετάβαση από τις προτάσεις των μοντέλων σε μία τεκμηριωμένη αρχιτεκτονική και τεχνική μελέτη.

6.7 Σύγκριση της ιεράρχησης και του κριτικού αυτοελέγχου των δύο μοντέλων

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, τα δύο μοντέλα κλήθηκαν να επανεξετάσουν τις παρεμβάσεις που είχαν ήδη προτείνει, χωρίς να προσθέσουν νέες. Η διαδικασία περιλάμβανε την ιεράρχηση των παρεμβάσεων, την εκτίμηση της τεχνικής εφαρμοσιμότητάς τους, τη σύνδεσή τους με τα διαθέσιμα δεδομένα και την αναγνώριση πιθανών προβλημάτων αρχιτεκτονικής συμβατότητας. Παράλληλα, ζητήθηκε από τα μοντέλα να εντοπίσουν τις προτάσεις με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα και τα σημεία στα οποία ενδέχεται να είχαν εξαγάγει συμπεράσματα που δεν υποστηρίζονταν επαρκώς από το πληροφοριακό πακέτο.

Ο κριτικός αυτοέλεγχος δεν χρησιμοποιήθηκε ως ανεξάρτητη τεχνική επαλήθευση των σεναρίων. Εξετάστηκε ως ένδειξη της ικανότητας κάθε μοντέλου να αναγνωρίζει εκ των υστέρων τα όρια των απαντήσεών του, να διαχωρίζει την ύπαρξη ενός στοιχείου από την πραγματική του απόδοση και να αναθεωρεί τον βαθμό βεβαιότητας που είχε αποδώσει στις αρχικές προτάσεις.

6.7.1 Ιεράρχηση των παρεμβάσεων

Το ChatGPT διευκρίνισε ότι η ιεράρχηση αφορούσε κυρίως την ετοιμότητα κάθε παρέμβασης για περαιτέρω διερεύνηση και όχι το πιθανό μέγεθος του περιβαλλοντικού της οφέλους. Στο ελάχιστο σενάριο έθεσε πρώτη τη συντήρηση και την οργάνωση της υφιστάμενης ηλιοπροστασίας, δεύτερη την απογραφή και τη συντονισμένη λειτουργία των κλιματιστικών και τρίτη τη συντήρηση των ξύλινων κουφωμάτων. Η αποκατάσταση των διαδρομών αερισμού τοποθετήθηκε τελευταία, επειδή η πραγματική συνέχεια και κατάσταση των οπών δεν ήταν γνωστές. Στο ολοκληρωμένο σενάριο προηγήθηκε η αποκατάσταση των κουφωμάτων, ακολούθησαν η αναδιαμόρφωση της αυλής και το εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας, ενώ η αναδιοργάνωση της ενεργητικής ψύξης τοποθετήθηκε τελευταία, καθώς θα έπρεπε να ακολουθήσει την αξιολόγηση των παθητικών παρεμβάσεων.

Το Gemini ιεράρχησε πρώτη στο ελάχιστο σενάριο την αντικατάσταση των κουρτινών, δεύτερη τη συντήρηση των ανεμιστήρων και τρίτη την επαναλειτουργία των παντζουριών. Η διάνοιξη των οπών αερισμού και η απομάκρυνση της ασφάλτου τοποθετήθηκαν χαμηλότερα, λόγω της μεγαλύτερης τεχνικής τους πολυπλοκότητας. Στο ολοκληρωμένο σενάριο, ωστόσο, έθεσε πρώτη τη συγκέντρωση ή απόκρυψη των κλιματιστικών, δεύτερη την προσθήκη νέων παντζουριών στον όροφο και τρίτη την αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων.

Προτεραιότητα	ChatGPT- Σενάριο Α	Gemini- Σενάριο Α	ChatGPT- Σενάριο Β	Gemini- Σενάριο Β
1	Υφιστάμενη ηλιοπροστασία	Αντικατάσταση κουρτινών	Αποκατάσταση κουφωμάτων	Αναδιοργάνωση κλιματιστικών
2	Καταγραφή και συντονισμός κλιματιστικών	Συντήρηση ανεμιστήρων	Αναδιαμόρφωση αύλειου χώρου	Νέα παντζούρια στον όροφο

Προτεραιότητα	ChatGPT- Σενάριο Α	Gemini- Σενάριο Α	ChatGPT- Σενάριο Β	Gemini- Σενάριο Β
3	Συντήρηση ξύλινων κουφωμάτων	Επαναλειτουργία παντζουριών	Εξωτερική ηλιοπροστασία	Αποκατάσταση βόρειων υαλοστασίων
4	Πιλοτική σκίαση και φύτευση	Διάνοιξη οπών αερισμού	Οργανωμένος αερισμός	Ενσωμάτωση πλεγμάτων
5	Έλεγχος διαδρομών αερισμού	Τοπική απομάκρυνση ασφάλτου	Αναδιοργάνωση ενεργητικής ψύξης	Αντικατάσταση υλικών αυλής

Πίνακας 12 Ιεράρχηση των παρεμβάσεων από τα δύο μοντέλα

Στο ελάχιστο επίπεδο, οι δύο ιεραρχήσεις συγκλίνουν ως προς την προτεραιότητα των εσωτερικών και συντηρητικών επεμβάσεων έναντι των εργασιών στον αύλειο χώρο και στις κλεισμένες διαδρομές αερισμού. Διαφέρουν, ωστόσο, ως προς την αντιμετώπιση των κλιματιστικών. Το ChatGPT θεώρησε άμεση και χρήσιμη την απογραφή τους, ενώ το Gemini δεν τα συμπεριέλαβε καθόλου στο ελάχιστο σενάριο.

Στο ολοκληρωμένο επίπεδο, η διαφοροποίηση είναι μεγαλύτερη. Το ChatGPT έδωσε προτεραιότητα στην καταγραφή και αποκατάσταση βασικών στοιχείων του κελύφους, αφήνοντας την αναδιοργάνωση των μηχανικών συστημάτων για το τέλος. Αντίθετα, το Gemini έθεσε πρώτη την επέμβαση στις κλιματιστικές μονάδες, κυρίως λόγω της οπτικής τους επίδρασης στην όψη. Η επιλογή αυτή δείχνει ότι η ιεράρχησή του επηρεάστηκε σημαντικά από τον στόχο της μορφολογικής αποκατάστασης και όχι αποκλειστικά από τη σειρά που θα ακολουθούσε μία βιοκλιματική και ενεργειακή διερεύνηση.

6.7.2 Αναγνώριση της τεχνικής αβεβαιότητας

Το ChatGPT αναθεώρησε αυστηρά τον βαθμό εφαρμοσιμότητας των περισσότερο σύνθετων παρεμβάσεών του. Χαρακτήρισε μη αξιολογήσιμα με τα διαθέσιμα στοιχεία το νέο εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας, το οργανωμένο σύστημα αερισμού και την αναδιοργάνωση της ενεργητικής ψύξης. Για το πρώτο επισήμανε την απουσία ακριβών

διαστάσεων, ηλιακής ανάλυσης και στοιχείων αγκύρωσης. Για το δεύτερο ανέφερε ότι δεν τεκμηριώνονται οι πραγματικές διαδρομές και οι παροχές του αέρα. Για το τρίτο αναγνώρισε ότι απουσιάζουν στοιχεία ισχύος, φορτίων, κατανάλωσης και τρόπου λειτουργίας.

Παράλληλα, κατέταξε τη συντήρηση των κουφωμάτων και την πιλοτική επέμβαση στην αυλή ως μέτριας εφαρμοσιμότητας και όχι ως αυτόματα υλοποιήσιμες. Ακόμη και οι παρεμβάσεις του ελάχιστου σεναρίου συνδέθηκαν με αυτοψίες, μετρήσεις και τεχνικούς ελέγχους. Η συντήρηση της υφιστάμενης ηλιοπροστασίας αποτέλεσε τη μόνη παρέμβαση που συνδέθηκε σχεδόν αποκλειστικά με άμεσα διαθέσιμα στοιχεία.

Το Gemini χαρακτήρισε υψηλής εφαρμοσιμότητας την αντικατάσταση των κουρτινών, τη συντήρηση των ανεμιστήρων και την επαναλειτουργία των παντζουριών. Αντίθετα, απέδωσε μέτρια εφαρμοσιμότητα στη διάνοιξη των οπών και στην αφαίρεση της ασφάλτου. Όλες οι παρεμβάσεις του ολοκληρωμένου σεναρίου αξιολογήθηκαν ως μέτριας εφαρμοσιμότητας, παρότι αρκετές από αυτές προϋπέθεταν στατικές, ηλεκτρομηχανολογικές ή άλλες ειδικές μελέτες.

Η σύγκριση δείχνει ότι το ChatGPT χρησιμοποίησε περισσότερο αυστηρά την κατηγορία «δεν μπορεί να αξιολογηθεί με τα διαθέσιμα δεδομένα». Το Gemini αναγνώρισε την ανάγκη ειδικών μελετών, αλλά διατήρησε για όλες τις ολοκληρωμένες παρεμβάσεις τη μέτρια τεχνική εφαρμοσιμότητα. Η στάση αυτή υποδηλώνει μεγαλύτερη προθυμία να θεωρήσει μία πρόταση κατ' αρχήν εφαρμόσιμη, ακόμη και όταν δεν είχαν επιβεβαιωθεί βασικές τεχνικές προϋποθέσεις.

6.7.3 Παρεμβάσεις κατάλληλες για άμεση διερεύνηση

Οι τρεις παρεμβάσεις που επέλεξε το ChatGPT για άμεση περαιτέρω διερεύνηση ήταν:

1. η συντήρηση και οργάνωση της υφιστάμενης ηλιοπροστασίας,
2. ο λειτουργικός έλεγχος των ξύλινων κουφωμάτων,
3. η απογραφή και η αξιολόγηση των κλιματιστικών μονάδων.

Η επιλογή βασίστηκε στην άμεση παρατηρησιμότητα των στοιχείων, στη μικρή κατασκευαστική όχληση και στη δυνατότητα συλλογής χρήσιμων δεδομένων χωρίς προηγούμενη μεταβολή του κελύφους. Ιδιαίτερα η απογραφή των κλιματιστικών παρουσιάστηκε ως τρόπος αποφυγής ατεκμηρίωτων συμπερασμάτων σχετικά με την κατανάλωση, την απόδοση ή την ανάγκη αντικατάστασής τους.

Το Gemini επέλεξε:

1. την επαναλειτουργία των παντζουριών του ισογείου,
2. τη μορφολογική αναδιοργάνωση των κλιματιστικών,
3. την αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων.

Η πρώτη επιλογή είναι περιορισμένη και συμβατή με τη λογική άμεσης διερεύνησης. Οι άλλες δύο, όμως, αφορούν σύνθετες παρεμβάσεις του ολοκληρωμένου σεναρίου. Το ίδιο το Gemini είχε αναγνωρίσει ότι απαιτούν ειδική τεχνική μελέτη και ότι παρουσιάζουν υψηλή επίδραση στην αρχιτεκτονική φυσιολογία.

Η επιλογή του ChatGPT επικεντρώνεται κυρίως στην άμεση συλλογή πληροφοριών, ενώ η επιλογή του Gemini περισσότερο στην άμεση εξέταση λύσεων. Η πρώτη προσέγγιση είναι πιο συντηρητική και συμβατή με τον προκαταρκτικό χαρακτήρα της έρευνας. Η δεύτερη παράγει πιο σαφή σχεδιαστική κατεύθυνση, αλλά συνδέει την έννοια της προτεραιότητας με το πιθανό όφελος ή τη μορφολογική σημασία και όχι αποκλειστικά με την τεχνική ετοιμότητα.

6.7.4 Προτάσεις με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα

Το ChatGPT εντόπισε τέσσερις βασικές περιοχές υψηλής αβεβαιότητας:

- την αποκατάσταση του οργανωμένου φυσικού και υποβοηθούμενου αερισμού,
- το νέο εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας,
- την αναδιοργάνωση της ενεργητικής ψύξης,
- την εκτεταμένη αναδιαμόρφωση της αυλής.

Για κάθε περιοχή προσδιόρισε ποια συγκεκριμένα στοιχεία απουσίαζαν: διαδρομές και παροχές αέρα, ακριβείς διαστάσεις και δεδομένα ηλιασμού, ψυκτικά φορτία και καταναλώσεις, καθώς και τοπογραφικά και μικροκλιματικά δεδομένα.

Το Gemini εντόπισε ως περισσότερο αβέβαιες τη διάνοιξη των οπών αερισμού και τις παρεμβάσεις στην αυλή. Στην πρώτη περίπτωση αναγνώρισε την άγνοια για την εσωτερική κατάσταση και τη βατότητα των διαδρομών. Στη δεύτερη σημείωσε την απουσία τοπογραφικού, δικτύων υποδομής και υψομετρικών στοιχείων.

Η αυτοκριτική του Gemini ήταν ορθή ως προς τα συγκεκριμένα ζητήματα, αλλά κάλυψε μικρότερο μέρος των προτάσεών του. Δεν συμπεριέλαβε, για παράδειγμα, στις προτάσεις υψηλής αβεβαιότητας τη μεταφορά των κλιματιστικών ή την αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων, παρότι και οι δύο απαιτούν σημαντικές τεχνικές παραδοχές. Αντίθετα, το ChatGPT εξέτασε την αβεβαιότητα σε όλα σχεδόν τα βασικά πεδία του ολοκληρωμένου σεναρίου.

6.7.5 Επίδραση στην ιστορική φυσιογνωμία

Το ChatGPT αναγνώρισε ως μεγαλύτερο μορφολογικό κίνδυνο το νέο εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας, επειδή θα μπορούσε να αποκρύψει τη λιθοδομή και να μεταβάλει τον ρυθμό των ανοιγμάτων. Στη συνέχεια κατέγραψε τους κινδύνους που θα μπορούσαν να προκύψουν από την αναβάθμιση των κουφωμάτων, την αναδιοργάνωση των εξωτερικών μονάδων και την εισαγωγή νέων εμφανών στοιχείων αερισμού.

Το Gemini αναγνώρισε ότι η προσθήκη νέων παντζουριών στον όροφο μπορούσε να αλλοιώσει την ιστορική φυσιογνωμία, επειδή τα διαθέσιμα σχέδια και οι φωτογραφίες δεν τεκμηριώναν την προηγούμενη ύπαρξή τους. Πρόκειται για σημαντική αναθεώρηση της αρχικής πρότασης, στην οποία τα νέα παντζούρια είχαν παρουσιαστεί ως μορφολογικά συμβατή συνέχεια των αντίστοιχων στοιχείων του ισόγειου. Επισημάνε επίσης ότι η ενσωμάτωση των πλεγμάτων στα κουφώματα θα μετέβαλλε άμεσα την εικόνα και τον ρυθμό των ανοιγμάτων.

Στο συγκεκριμένο σημείο, ο αυτοέλεγχος του Gemini είχε ουσιαστική διορθωτική λειτουργία. Το μοντέλο αναγνώρισε εκ των υστέρων ότι μία πρόταση που είχε διατυπωθεί ως μορφολογικά συμβατή στηριζόταν σε μη επιβεβαιωμένη αναλογία μεταξύ ισόγειου και πρώτου ορόφου. Η διαπίστωση αυτή αποτελεί ένα από τα σαφέστερα παραδείγματα χρήσιμης αυτοκριτικής στην απάντησή του.

6.7.6 Πρόσθετα δεδομένα που θα μπορούσαν να μεταβάλουν τις προτάσεις

Και τα δύο μοντέλα αναγνώρισαν ότι το πιθανό καθεστώς προστασίας και η στατική επάρκεια του κτιρίου θα μπορούσαν να μεταβάλουν ουσιαστικά τις προτάσεις. Το ChatGPT πρόσθεσε τις μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, CO₂ και φωτισμού, την

αποτύπωση των ανοιγμάτων, την ηλιακή μελέτη, τον έλεγχο των κουφωμάτων, την απογραφή των διαδρομών αερισμού, την καταγραφή των κλιματιστικών και τις μικροκλιματικές μετρήσεις της αυλής.

Το Gemini επικεντρώθηκε σε τρεις κυρίως κατηγορίες δεδομένων: στο θεσμικό καθεστώς προστασίας, στη στατική επάρκεια της λιθοδομής και στην ηλεκτρομηχανολογική μελέτη του συστήματος ψύξης. Αναγνώρισε ότι τα στοιχεία αυτά θα μπορούσαν να αποκλείσουν τα νέα παντζούρια, να περιορίσουν τις επεμβάσεις στα κουφώματα ή να οδηγήσουν σε διαφορετική οργάνωση της ψύξης.

Η απάντηση του ChatGPT ήταν περισσότερο ολοκληρωμένη ως προς τη σύνδεση κάθε ελλείποντος δεδομένου με συγκεκριμένο τμήμα του σεναρίου. Η απάντηση του Gemini ήταν πιο σύντομη, αλλά εντόπισε ορθά ορισμένους από τους περισσότερο καθοριστικούς εξωτερικούς περιορισμούς.

6.7.7 Αναγνώριση μη επαρκώς υποστηριζόμενων συμπερασμάτων

Το ChatGPT αναγνώρισε έξι βασικές υποθέσεις που δεν είχαν επαρκή εμπειρική επιβεβαίωση:

- ότι οι νότιες αίθουσες υπερθερμαίνονται,
- ότι οι κουρτίνες και τα παντζούρια είναι ανεπαρκή,
- ότι τα κλεισμένα στοιχεία αερισμού προκαλούν ανεπαρκή ποιότητα αέρα,
- ότι οι σκληρές επιφάνειες της αυλής επιβαρύνουν αισθητά τις αίθουσες,
- ότι τα κλιματιστικά λειτουργούν υπερβολικά ή αναποτελεσματικά,
- ότι το αρχικό σύστημα αερισμού και το εξωτερικό σύστημα σκίασης μπορούν τεχνικά να εφαρμοστούν.

Για κάθε περίπτωση εξήγησε τη διαφορά ανάμεσα σε αυτό που τεκμηριώνεται από το πακέτο και σε αυτό που παραμένει υπόθεση. Για παράδειγμα, η ορατή παρουσία πολλών εξωτερικών μονάδων δεν θεωρήθηκε απόδειξη ενεργειακής αναποτελεσματικότητας, ενώ η ύπαρξη των γριλιών δεν θεωρήθηκε απόδειξη ότι οι διαδρομές αερισμού παραμένουν λειτουργικές.

Το Gemini αναγνώρισε δύο κύριους κινδύνους μη υποστηριζόμενων συμπερασμάτων. Ο πρώτος αφορούσε την υπόθεση ότι η άσφαλτος επιβαρύνει θερμικά τις αίθουσες, χωρίς διαθέσιμες επιφανειακές και εσωτερικές θερμοκρασίες. Ο δεύτερος αφορούσε την

αποτελεσματικότητα των ανεμιστήρων, καθώς δεν ήταν γνωστά η παροχή, η λειτουργική κατάσταση και το κατά πόσο απομακρύνουν ή απλώς ανακυκλώνουν τον θερμό αέρα.

Η παραδοχή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή το Gemini είχε αρχικά παρουσιάσει το δυσμενές μικροκλίμα της αυλής ως επιβεβαιωμένο πρόβλημα και τη συντήρηση των ανεμιστήρων ως λύση υψηλής εφαρμοσιμότητας. Ο αυτοέλεγχος μείωσε την αρχική βεβαιότητα, χωρίς όμως να επανεξετάσει εξίσου αναλυτικά άλλες υποθέσεις, όπως την ανεπάρκεια του σημερινού αερισμού, την πιθανή χαμηλή απόδοση των κλιματιστικών ή την αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων στην «αρχική μορφή του 1931».

6.7.8 Συνολική αποτίμηση του κριτικού αυτοελέγχου

Και τα δύο μοντέλα ανταποκρίθηκαν στη διαδικασία αυτοελέγχου και αναγνώρισαν ότι οι αρχικές προτάσεις τους δεν μπορούσαν να αντιμετωπιστούν ως έτοιμες λύσεις εφαρμογής. Επίσης, και τα δύο εντόπισαν τη σημασία της αυτοψίας, των μετρήσεων, της στατικής διερεύνησης και του ελέγχου του θεσμικού καθεστώτος.

Το ChatGPT παρουσίασε περισσότερο συστηματικό και αυστηρό αυτοέλεγχο. Επανεξέτασε κάθε παρέμβαση, χρησιμοποίησε συχνά την κατηγορία της μη αξιολογήσιμης πρότασης και εντόπισε ένα ευρύ σύνολο πιθανών ατεκμηρίωτων συμπερασμάτων. Η ιεράρχησή του ήταν προσανατολισμένη πρώτα στη συλλογή δεδομένων και στη συντήρηση και στη συνέχεια στη διαμόρφωση νέων λύσεων.

Το Gemini παρήγαγε χρήσιμη αυτοκριτική, ιδιαίτερα ως προς τα νέα παντζούρια του ορόφου, τις επεμβάσεις στην αυλή και την άγνωστη αποτελεσματικότητα των ανεμιστήρων. Ωστόσο, ο έλεγχός του ήταν περισσότερο επιλεκτικός. Ορισμένες σύνθετες παρεμβάσεις διατηρήθηκαν σε υψηλή προτεραιότητα, παρότι το ίδιο το μοντέλο αναγνώρισε ότι απαιτούσαν ειδικές μελέτες και μπορούσαν να επηρεάσουν σημαντικά την αρχιτεκτονική φυσιογνωμία.

Επομένως, ο κριτικός αυτοέλεγχος βελτίωσε την αξιοπιστία και των δύο αποτελεσμάτων, χωρίς να εξαλείψει την ανάγκη εξωτερικής αξιολόγησης. Η δυνατότητα ενός μοντέλου να αναγνωρίζει τις αβεβαιότητες των προτάσεών του είναι χρήσιμη, αλλά δεν αποτελεί από μόνη της επιβεβαίωση της τεχνικής ορθότητας. Τα αποτελέσματα εξακολουθούν να απαιτούν ανθρώπινη κρίση, επιτόπια τεκμηρίωση και έλεγχο από τις κατάλληλες τεχνικές ειδικότητες.

7. Συζήτηση, συμπεράσματα και προτάσεις

7.1 Συζήτηση των αποτελεσμάτων

Η παρούσα έρευνα εξέτασε τη δυνατότητα δύο εφαρμογών παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης, του ChatGPT και του Gemini, να υποστηρίξουν την προκαταρκτική διαμόρφωση σεναρίων βιοκλιματικής αναβάθμισης για τη νότια ζώνη του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου. Η βασική διαπίστωση δεν περιορίζεται στο ότι τα δύο μοντέλα κατάφεραν να παραγάγουν έναν αριθμό σχεδιαστικών προτάσεων. Το σημαντικότερο εύρημα είναι ότι μπόρεσαν να οργανώσουν ένα σύνθετο και ετερογενές σύνολο αρχιτεκτονικών, τεχνικών και φωτογραφικών πληροφοριών σε συνεκτικές κατευθύνσεις παρέμβασης, διατηρώντας σε μεγάλο βαθμό τη σύνδεση με το συγκεκριμένο κτίριο. Παράλληλα, όμως, η έρευνα ανέδειξε ότι η ποιότητα αυτών των κατευθύνσεων εξαρτάται άμεσα από τη δομή των εισροών, τη διατύπωση των prompts, τον τρόπο με τον οποίο κάθε μοντέλο διαχειρίζεται την αβεβαιότητα και, τελικά, από την ανθρώπινη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η δυνατότητα των δύο εργαλείων να συνθέσουν το πληροφοριακό πακέτο συμφωνεί με τη βιβλιογραφική θέση ότι τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να συμβάλουν στη διαχείριση της αδόμητης τεχνικής γνώσης. Στον κλάδο της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και των κατασκευών, μεγάλο μέρος της πληροφορίας βρίσκεται σε τεχνικές εκθέσεις, περιγραφές, κανονιστικά κείμενα, σχέδια και συνοδευτικά έγγραφα. Τα LLMs μπορούν να διευκολύνουν την ανάκτηση, τη σύνοψη, την κατηγοριοποίηση και τη μετατροπή αυτής της πληροφορίας σε δομημένες εξαγωγές που υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων (Zhao et al., 2023; Zhang et al., 2025). Στην παρούσα περίπτωση, αυτή η λειτουργία εκφράστηκε μέσα από τη μετατροπή του πληροφοριακού υλικού σε δύο επίπεδα παρέμβασης, τη σύνδεση των προτάσεων με επιμέρους στοιχεία του κτιρίου και την παράλληλη καταγραφή προβλημάτων, προϋποθέσεων και περιορισμών.

Η παραγωγή θεματικά συγκρίσιμων προτάσεων από τα δύο μοντέλα δείχνει, επίσης, ότι ένα σαφώς οριοθετημένο πρόβλημα μπορεί να καθοδηγήσει τη γενετική ικανότητα των εφαρμογών προς σχεδιαστικά χρήσιμες κατευθύνσεις. Η έρευνα δεν ζήτησε από τα μοντέλα να «σχεδιάσουν ένα βιώσιμο σχολείο» με γενικούς όρους. Τους παρείχε συγκεκριμένο κτιριακό πλαίσιο, σαφή χωρική οριοθέτηση και κοινές παραμέτρους, όπως η ηλιοπροστασία, ο φυσικός φωτισμός, ο αερισμός, η θερινή θερμική άνεση και η

αρχιτεκτονική συμβατότητα. Με τον τρόπο αυτό περιορίστηκε ο χώρος των πιθανών απαντήσεων και αυξήθηκε η συνάφειά τους με το πραγματικό αντικείμενο. Η διαπίστωση αυτή υποστηρίζει την άποψη ότι η αποτελεσματική αξιοποίηση της ΤΝ στον σχεδιασμό εξαρτάται λιγότερο από μια αφηρημένη «ευφυΐα» του συστήματος και περισσότερο από την ποιότητα της οργάνωσης της πληροφορίας και των κριτηρίων που τίθενται στη διαδικασία.

Η σημασία αυτής της οργάνωσης γίνεται εμφανέστερη από το γεγονός ότι οι αποφάσεις βιώσιμης αναβάθμισης ενός σχολικού κτιρίου είναι πολυκριτηριακές. Η θερμική άνεση, ο φυσικός φωτισμός, η ποιότητα του αέρα, η ασφάλεια, η λειτουργικότητα, η συντήρηση και η προστασία της αρχιτεκτονικής φυσιογνωμίας δεν μπορούν να εξεταστούν ανεξάρτητα. Στα σχολικά περιβάλλοντα οι παράμετροι αυτές συνδέονται επιπλέον με την υγεία, την ευεξία και την καθημερινή εμπειρία των μαθητών και των εκπαιδευτικών. Αντίστοιχα, οι αυλές δεν λειτουργούν μόνο ως επιφάνειες προς μικροκλιματική βελτιστοποίηση, αλλά ως χώροι κίνησης, παιχνιδιού, επιτήρησης και κοινωνικής αλληλεπίδρασης (Antoniadis et al., 2020; Heath&Mendell, 2002; Turunen et al., 2014). Επομένως, μία πρόταση μπορεί να είναι βιοκλιματικά εύλογη αλλά λειτουργικά προβληματική ή μορφολογικά ασύμβατη. Η ανάγκη αυτής της ισορροπίας αποτυπώθηκε ιδιαίτερα στις προτάσεις που αφορούσαν τις σκληρές επιφάνειες της αυλής, τις νέες σκιάσεις, τα μεταλλικά πλέγματα και τις διαδρομές αερισμού.

Παρά το κοινό πληροφοριακό υπόβαθρο, τα δύο μοντέλα δεν παρήγαγαν ταυτόσημη λογική σχεδιασμού. Το ChatGPT κινήθηκε περισσότερο προς μία σταδιακή διαδικασία ελέγχου, συντήρησης και πιλοτικής εφαρμογής. Η επαναλαμβανόμενη χρήση διατυπώσεων όπως «διερεύνηση», «αποτύπωση», «έλεγχος» και «εφόσον επιβεβαιωθεί» μείωσε την αμεσότητα ορισμένων προτάσεων, αλλά περιόρισε παράλληλα τον κίνδυνο να παρουσιαστούν οι υποθέσεις ως τεχνικά δεδομένα. Το Gemini διαμόρφωσε περισσότερο συγκεκριμένες και ευκολότερα οπτικοποιήσιμες λύσεις, όπως νέα παντζούρια, αντικατάσταση επιστρώσεων και μετακίνηση εγκαταστάσεων. Η σχεδιαστική αυτή σαφήνεια ενίσχυσε τη χρησιμότητά του ως εργαλείου παραγωγής ιδεών, αλλά αύξησε και την εξάρτηση των προτάσεων από παραδοχές οι οποίες δεν είχαν επιβεβαιωθεί.

Η διαφορά αυτή δεν πρέπει να ερμηνευθεί απλώς ως υπεροχή του ενός μοντέλου σε κάθε πιθανή εφαρμογή. Αναδεικνύει διαφορετικούς τρόπους παραγωγής αποτελέσματος. Η

περισσότερο επιφυλακτική απάντηση μπορεί να είναι καταλληλότερη όταν η αρχική τεκμηρίωση είναι ελλιπής και οι τεχνικές συνέπειες σημαντικές. Η περισσότερο συγκεκριμένη απάντηση μπορεί να είναι χρήσιμη κατά τη φάση της ιδεοπαραγωγής, επειδή προσφέρει σαφέστερα αντικείμενα προς εξέταση και απόρριψη.

Ωστόσο, όσο αυξάνεται η συγκεκριμενοποίηση μιας πρότασης, τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η ανάγκη να τεκμηριωθούν η γεωμετρία, τα υλικά, η κατασκευαστική δυνατότητα, οι επιπτώσεις στη λειτουργία και η συμμόρφωση με το θεσμικό πλαίσιο. Κατά συνέπεια, η παραγωγή μιας πιο «έτοιμης» σχεδιαστικής εικόνας δεν συνεπάγεται αυτομάτως και υψηλότερη τεχνική ωριμότητα.

Το εύρημα αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε σχέση με τη διάκριση ανάμεσα στα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα και στα συστήματα υπολογιστικά υποστηριζόμενου ή performance-driven generative design. Στη δεύτερη περίπτωση, οι εναλλακτικές λύσεις συνδέονται με συγκεκριμένες μετρικές και με επαναληπτικούς κύκλους προσομοίωσης και αξιολόγησης. Η ενεργειακή κατανάλωση, η υπερθέρμανση, ο φυσικός φωτισμός ή άλλοι δείκτες χρησιμοποιούνται για να συγκριθούν και να βελτιστοποιηθούν οι εναλλακτικές, αντί να εκτιμώνται μόνο ποιοτικά (Huang et al., 2025; Suphavarophas et al., 2024). Στην παρούσα εργασία, το ChatGPT και το Gemini δεν είχαν πρόσβαση σε ενεργειακό μοντέλο, ωριαία κλιματικά δεδομένα, ακριβή γεωμετρία, μετρήσεις εσωτερικών συνθηκών ή αποτελέσματα προσομοίωσης. Επομένως, τα παραγόμενα σενάρια δεν αποτελούν μορφή πραγματικής υπολογιστικής βελτιστοποίησης. Αποτελούν οργανωμένες υποθέσεις σχεδιασμού που μπορούν να καθοδηγήσουν το επόμενο στάδιο μετρήσεων και τεχνικής διερεύνησης.

Η διάκριση αυτή εξηγεί και γιατί δεν ήταν δυνατόν να αποδοθούν ποσοτικά οφέλη στις παρεμβάσεις. Η διατύπωση ότι μία λύση «θα βελτιώσει» τον αερισμό, τη θερμική άνεση ή το μικροκλίμα δεν μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με την απόδειξη του μεγέθους της βελτίωσης. Χωρίς καταγραφή θερμοκρασίας, υγρασίας, CO₂, παροχών αέρα, επιπέδων φυσικού φωτισμού και ενεργειακής κατανάλωσης, η επίδραση παραμένει πιθανή και όχι μετρημένη. Η έρευνα, συνεπώς, επιβεβαιώνει ότι η γλωσσική πειστικότητα και η τεχνική ορολογία μιας απάντησης δεν αποτελούν από μόνες τους ένδειξη πραγματολογικής ακρίβειας. Η βιβλιογραφία έχει επισημάνει ότι τα LLMs μπορούν να παράγουν εύλογες αλλά ανακριβείς ή μη τεκμηριωμένες πληροφορίες και ότι η γλωσσική ευχέρεια δεν

πρέπει να συγχέεται με την τεχνική εγκυρότητα (Bommasani et al., 2021; Huang et al., 2023; Zhao et al., 2023).

Σε αυτό το πλαίσιο, η εφαρμογή του τρίτου prompt, μέσω του οποίου τα μοντέλα κλήθηκαν να επανεξετάσουν τις προτάσεις τους, αποδείχθηκε ουσιαστικό μέρος της μεθοδολογίας και όχι απλή συμπληρωματική ερώτηση. Ο κριτικός αυτοέλεγχος ανάγκασε τα εργαλεία να μετακινηθούν από την παραγωγή λύσεων προς την εξέταση των προϋποθέσεών τους. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η αναγνώριση ότι η παρουσία ενός στοιχείου στις φωτογραφίες ή στις τεχνικές περιγραφές δεν αποδεικνύει τη λειτουργική του κατάσταση. Η ύπαρξη γριλιών δεν αποδεικνύει τη συνέχεια των διαδρομών αερισμού, η παρουσία κλιματιστικών δεν αποδεικνύει ενεργειακή αναποτελεσματικότητα και η ύπαρξη σκληρών επιφανειών δεν αρκεί για να ποσοτικοποιηθεί η επίδρασή τους στις αίθουσες. Το ChatGPT ανέπτυξε αυτή τη διάκριση περισσότερο συστηματικά, ενώ το Gemini αναθεώρησε ορισμένες σημαντικές αρχικές του παραδοχές, κυρίως ως προς τα νέα παντζούρια του ορόφου και τις επεμβάσεις στην αυλή.

Ωστόσο, ο αυτοέλεγχος ενός μοντέλου δεν μπορεί να λειτουργήσει ως ανεξάρτητη επαλήθευση του ίδιου του μοντέλου. Το εργαλείο εξακολουθεί να επεξεργάζεται το πρόβλημα μέσα από τις ίδιες γενικές δυνατότητες και τους ίδιους περιορισμούς που παρήγαγαν την αρχική απάντηση. Μπορεί να εντοπίσει εμφανείς αντιφάσεις ή να μειώσει τη βεβαιότητα μιας πρότασης, αλλά δεν μπορεί να αντικαταστήσει νέα εμπειρικά δεδομένα ή εξειδικευμένη τεχνική γνώση. Η διεθνής βιβλιογραφία προτείνει, για τον λόγο αυτό, τη χρήση μηχανισμών human-in-the-loop, την ιχνηλασιμότητα των πηγών, τη σύνδεση με δομημένα αποθετήρια και τη χρήση σαφών διαδικασιών ελέγχου και αξιολόγησης (Huang et al., 2023; Tonmoy et al., 2024). Τα LLMs είναι περισσότερο αξιόπιστα όταν εντάσσονται ως ελεγχόμενα εργαλεία σε μία ευρύτερη ροή εργασίας και όχι όταν αντιμετωπίζονται ως αυτόνομες πηγές τεχνικής αλήθειας.

Η ανάγκη ανθρώπινης εποπτείας ενισχύεται από τον ιστορικό χαρακτήρα της μελέτης περίπτωσης. Η επέμβαση σε ένα κτίριο με αναγνωρίσιμη λιθοδομή, σταθερό ρυθμό ανοιγμάτων και χαρακτηριστικά ξύλινα κουφώματα δεν αποτελεί απλό πρόβλημα ενεργειακής αναβάθμισης. Απαιτεί αξιολόγηση της αυθεντικότητας, της αναστρεψιμότητας και της σχέσης κάθε νέου στοιχείου με την αρχική σύνθεση. Τα δύο μοντέλα μπόρεσαν να ενσωματώσουν αυτά τα ζητήματα στις απαντήσεις τους, επειδή

είχαν τεθεί ως ρητοί περιορισμοί. Δεν μπορούσαν, όμως, να αποφασίσουν αν μία νέα κατασκευή είναι πράγματι μορφολογικά αποδεκτή χωρίς ιστορική τεκμηρίωση, λεπτομερή αποτύπωση και γνώση του θεσμικού καθεστώτος. Η συγκεκριμένη περίπτωση δείχνει, επομένως, ότι η TN μπορεί να υπενθυμίζει και να οργανώνει κριτήρια προστασίας, αλλά η τελική αρχιτεκτονική κρίση παραμένει ανθρώπινη και διεπιστημονική.

Σε ευρύτερο επίπεδο, τα αποτελέσματα ενισχύουν την αντίληψη της TN ως βοηθητικού ή συνεργατικού παρά ως αυτόνομου σχεδιαστικού παράγοντα. Η σχετική βιβλιογραφία διακρίνει έναν βοηθητικό ρόλο, στον οποίο το σύστημα επιταχύνει αναζητήσεις και υπολογισμούς, έναν συνεργατικό ρόλο, στον οποίο άνθρωπος και εργαλείο αναπτύσσουν επαναληπτικά τη λύση, και έναν ηγετικό ρόλο, στον οποίο το σύστημα παράγει το κύριο σχεδιαστικό αποτέλεσμα και ο άνθρωπος περιορίζεται στην αξιολόγησή του (Li et al., 2025; Albukhari, 2025). Τα ευρήματα της παρούσας έρευνας υποστηρίζουν κυρίως τις δύο πρώτες μορφές. Τα μοντέλα ήταν χρήσιμα στη γρήγορη παραγωγή εναλλακτικών, στην οργάνωση των κριτηρίων και στον εντοπισμό αναγκαίων ελέγχων. Δεν ήταν, όμως, σε θέση να αναλάβουν υπεύθυνα τον τελικό καθορισμό της λύσης, επειδή δεν διέθεταν τα απαιτούμενα εμπειρικά, κανονιστικά και κατασκευαστικά δεδομένα.

Η βασική συνεισφορά της παραγωγικής TN στη συγκεκριμένη περίπτωση εντοπίζεται, συνεπώς, στη διεύρυνση και στη συστηματοποίηση της προκαταρκτικής διερεύνησης. Ένα κατάλληλα οργανωμένο μοντέλο μπορεί να βοηθήσει τον μελετητή να εντοπίσει περισσότερες εναλλακτικές, να συγκρίνει επίπεδα παρέμβασης, να καταγράψει τις προϋποθέσεις κάθε επιλογής και να διαμορφώσει ένα πρόγραμμα επόμενων ενεργειών. Η διαδικασία αυτή μπορεί να μειώσει τον χρόνο της αρχικής οργάνωσης του προβλήματος και να λειτουργήσει ως βάση συζήτησης μεταξύ αρχιτεκτόνων, μηχανικών, εκπαιδευτικών και φορέων διαχείρισης. Η τελική αξία, όμως, δεν βρίσκεται στην αυτούσια αποδοχή των προτάσεων, αλλά στη δυνατότητα του ανθρώπου να τις ελέγξει, να τις συνδυάσει, να τις απορρίψει ή να τις μετασχηματίσει.

Από τη σύνθεση των αποτελεσμάτων προκύπτει ένα σαφές πρότυπο υπεύθυνης χρήσης: πρώτα συγκροτείται ένα επαρκώς τεκμηριωμένο πληροφοριακό πακέτο, στη συνέχεια διατυπώνονται σαφείς περιορισμοί και κοινά κριτήρια, παράγονται περισσότερα του ενός επίπεδα σεναρίων, ζητείται ρητά η αναγνώριση των αβεβαιοτήτων και, τέλος, οι

απαντήσεις υποβάλλονται σε ανεξάρτητη ανθρώπινη και τεχνική αξιολόγηση. Μόνο μετά από αυτοψία, μετρήσεις και ειδικές μελέτες μπορούν ορισμένες από τις κατευθύνσεις να μετατραπούν σε ώριμες προτάσεις. Η ΤΝ, επομένως, δεν καταργεί τα συμβατικά στάδια της αρχιτεκτονικής έρευνας και μελέτης. Μπορεί να τα προετοιμάσει και να τα υποστηρίξει, αλλά δεν μπορεί να τα παρακάμψει.

7.2 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

Η σύνθεση των αποτελεσμάτων επιτρέπει την άμεση απάντηση στα τέσσερα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας. Οι απαντήσεις αφορούν την απόδοση του ChatGPT και του Gemini υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες της παρούσας μελέτης περίπτωσης, με βάση το κοινό πληροφοριακό πακέτο, τον κοινό κορμό των prompts και το προκαθορισμένο πλαίσιο αξιολόγησης. Δεν συνιστούν γενική κατάταξη των δύο εφαρμογών ούτε τεκμηριώνουν την τεχνική αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων παρεμβάσεων χωρίς πρόσθετες μετρήσεις και ειδικές μελέτες.

7.2.1 Ποια εναλλακτικά σενάρια πρότειναν το ChatGPT και το Gemini για τη βιοκλιματική αναβάθμιση της νότιας ζώνης του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου Αγρινίου;

Και τα δύο εργαλεία ανταποκρίθηκαν στη βασική απαίτηση της έρευνας και παρήγαγαν δύο διακριτά επίπεδα παρέμβασης: ένα ελάχιστο σενάριο, προσανατολισμένο σε ήπιες και περισσότερο άμεσα εφαρμόσιμες ενέργειες, και ένα ολοκληρωμένο σενάριο, το οποίο περιλάμβανε εκτενέστερες παρεμβάσεις στο κέλυφος, στον αερισμό, στην ψύξη και στον άμεσα συνδεδεμένο αύλειο χώρο.

Στο ελάχιστο σενάριο, το ChatGPT έδωσε προτεραιότητα στην καταγραφή, στη συντήρηση και στην καλύτερη λειτουργική αξιοποίηση των υφιστάμενων στοιχείων. Πρότεινε, μεταξύ άλλων, τον έλεγχο και τη βελτίωση της χρήσης των υφιστάμενων μέσων σκίασης, την αποτύπωση και επισκευή των ξύλινων κουφωμάτων, τη διερεύνηση της κατάστασης των οπών και των διαδρομών αερισμού, τη συντήρηση των κλιματιστικών μονάδων και την πιλοτική εφαρμογή περιορισμένων επεμβάσεων σκίασης ή φύτευσης στον γειτονικό αύλειο χώρο. Η λογική του σεναρίου ήταν να προηγηθούν οι έλεγχοι και οι αναστρέψιμες ενέργειες πριν από την εισαγωγή νέων κατασκευών.

Το ελάχιστο σενάριο του Gemini κινήθηκε σε αντίστοιχους θεματικούς άξονες, αλλά διατύπωσε περισσότερο άμεσες ενέργειες. Περιλάμβανε την επαναλειτουργία των υφιστάμενων παντζουριών, την αντικατάσταση ή βελτίωση των εσωτερικών κουρτινών, τη διερεύνηση της διάνοιξης των στοιχείων αερισμού, τη συντήρηση των ανεμιστήρων και την τοπική απομάκρυνση σκληρών επιστρώσεων από τον αύλειο χώρο. Οι προτάσεις ήταν περισσότερο συγκεκριμένες ως προς το είδος της επέμβασης, αλλά ορισμένες από αυτές εξαρτώνταν από δεδομένα που δεν είχαν επιβεβαιωθεί, όπως η πραγματική λειτουργική κατάσταση των διαδρομών αερισμού και η μικροκλιματική επίδραση των υλικών της αυλής.

Στο ολοκληρωμένο σενάριο, το ChatGPT αντιμετώπισε τη νότια ζώνη ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα. Πρότεινε ένα εξωτερικό σύστημα ηλιοπροστασίας προσαρμοσμένο στον ρυθμό των ανοιγμάτων, συνολική αποκατάσταση και ενεργειακή βελτίωση των κουφωμάτων, οργανωμένη αξιοποίηση του φυσικού και υποβοηθούμενου αερισμού, αναδιοργάνωση της ενεργητικής ψύξης και περιορισμένη βιοκλιματική αναδιαμόρφωση του άμεσα γειτονικού αύλειου χώρου. Οι παρεμβάσεις διατυπώθηκαν ως κατευθύνσεις που απαιτούν αποτύπωση, υπολογισμούς, προσομοιώσεις και έλεγχο της συμβατότητάς τους με την αρχιτεκτονική φυσιογνωμία του κτιρίου.

Το ολοκληρωμένο σενάριο του Gemini περιλάμβανε περισσότερο κατασκευαστικά προσδιορισμένες λύσεις, όπως την τοποθέτηση νέων ξύλινων παντζουριών στον πρώτο όροφο, την αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων, την εκτενέστερη αντικατάσταση των σκληρών υλικών της αυλής, τη μετακίνηση ή απόκρυψη των εξωτερικών κλιματιστικών μονάδων και την ενσωμάτωση των πλεγμάτων ασφαλείας στα κουφώματα. Οι προτάσεις αυτές προσέφεραν σαφέστερη σχεδιαστική εικόνα, αλλά συνδέονταν με αυξημένη αβεβαιότητα ως προς την ιστορική τεκμηρίωση, τη στατική δυνατότητα, το κόστος και τη μορφολογική τους ένταξη.

Επομένως, το πρώτο ερευνητικό ερώτημα απαντάται θετικά. Τα δύο εργαλεία ήταν σε θέση να παράγουν εναλλακτικά και θεματικά συγκρίσιμα σενάρια, τα οποία κάλυψαν τους βασικούς άξονες της ηλιοπροστασίας, του φυσικού φωτισμού, του αερισμού, της ενεργητικής ψύξης, των κουφωμάτων και του υπαίθριου μικροκλίματος. Τα σενάρια, ωστόσο, παρέμειναν προκαταρκτικές κατευθύνσεις σχεδιασμού και όχι πλήρεις ή έτοιμες προς εφαρμογή τεχνικές λύσεις.

7.2.2 Σε ποιον βαθμό τα παραγόμενα σενάρια αξιοποίησαν ορθά το διαθέσιμο αρχιτεκτονικό, τεχνικό και κλιματικό υλικό και ανταποκρίθηκαν στις αρχές του βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού;

Τα δύο μοντέλα αξιοποίησαν σε ουσιαστικό βαθμό το πληροφοριακό πακέτο και δεν περιορίστηκαν σε γενικές συστάσεις που θα μπορούσαν να αφορούν οποιοδήποτε σχολικό κτίριο. Οι απαντήσεις τους συνδέθηκαν με συγκεκριμένα στοιχεία του Παπαστρατείου, όπως τα ξύλινα κουφώματα, τα παντζούρια, οι εσωτερικές κουρτίνες, τα μεταλλικά πλέγματα, οι ορατές γρίλιες και οπές αερισμού, τα βόρεια υαλοστάσια, οι ανεμιστήρες, οι εξωτερικές κλιματιστικές μονάδες και οι σκληρές επιφάνειες του αύλειου χώρου. Η συγκεκριμένη αναφορά σε υπαρκτά χαρακτηριστικά δείχνει ότι τα εργαλεία μπόρεσαν να μετατρέψουν το διαθέσιμο αρχιτεκτονικό και φωτογραφικό υλικό σε οργανωμένα πεδία σχεδιαστικής διερεύνησης.

Παράλληλα, τα σενάρια ανταποκρίθηκαν στους βασικούς άξονες του βιοκλιματικού σχεδιασμού που είχαν τεθεί στο πρωτόκολλο. Εξετάστηκαν ο περιορισμός της θερινής ηλιακής επιβάρυνσης, η διατήρηση του φυσικού φωτισμού, η αξιοποίηση του φυσικού αερισμού, η μείωση της εξάρτησης από την ενεργητική ψύξη και η βελτίωση των συνθηκών στον άμεσα γειτονικό υπαίθριο χώρο. Ιδιαίτερα στα ολοκληρωμένα σενάρια, οι παρεμβάσεις επιχειρήθηκε να συνδυαστούν και να μην αντιμετωπιστούν ως απομονωμένες τεχνικές ενέργειες.

Η αξιοποίηση του υλικού δεν ήταν, ωστόσο, εξίσου προσεκτική σε όλες τις απαντήσεις. Το ChatGPT συνέδεσε συστηματικότερα τις προτάσεις με τα διαθέσιμα τεκμήρια και διαχώρισε συχνότερα τις επιβεβαιωμένες πληροφορίες από τις υποθέσεις και τα ελλείποντα δεδομένα. Το Gemini αναγνώρισε τα περισσότερα από τα ίδια κτιριακά στοιχεία, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μετέβη γρηγορότερα από την παρατήρηση στην επιλογή συγκεκριμένης λύσης. Αυτό εμφανίστηκε, για παράδειγμα, στην πρόταση νέων παντζουριών στον όροφο, στην αποκατάσταση των βόρειων υαλοστασίων σε υποτιθέμενη αρχική μορφή και στην εκτενή αντικατάσταση των υλικών της αυλής.

Κανένα από τα δύο εργαλεία δεν μπορούσε να επιβεβαιώσει ποσοτικά την απόδοση των προτάσεών του. Δεν υπήρχαν μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, συγκέντρωσης CO₂, παροχής αέρα, φυσικού φωτισμού, ενεργειακής κατανάλωσης ή επιφανειακών θερμοκρασιών. Δεν πραγματοποιήθηκαν επίσης ενεργειακές, φωτομετρικές ή

μικροκλιματικές προσομοιώσεις. Συνεπώς, η ανταπόκριση στις αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού τεκμηριώθηκε σε ποιοτικό επίπεδο, με βάση τη λογική συνοχή των προτάσεων, και όχι μέσω υπολογιστικής επιβεβαίωσης του αναμενόμενου οφέλους.

Το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα απαντάται, επομένως, ότι τα δύο μοντέλα αξιοποίησαν ουσιαστικά το πληροφοριακό υλικό και ενσωμάτωσαν βασικές αρχές βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού. Η επίδοσή τους ήταν ισχυρότερη ως προς την αναγνώριση των σχετικών προβλημάτων και την παραγωγή ποιοτικών κατευθύνσεων και ασθενέστερη ως προς την ποσοτική επιβεβαίωση και την τεχνική εξειδίκευση των λύσεων.

7.2.3 Ποιες ομοιότητες και διαφορές παρουσίασαν τα σενάρια του ChatGPT και του Gemini ως προς το είδος, την έκταση και την ιεράρχηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων;

Η σημαντικότερη ομοιότητα ήταν η σύγκλιση των δύο μοντέλων στους βασικούς θεματικούς άξονες. Και τα δύο αναγνώρισαν την ανάγκη βελτίωσης της ηλιοπροστασίας, τη σημασία της κατάστασης και της λειτουργίας των κουφωμάτων, την πιθανή αξία αποκατάστασης των διαδρομών αερισμού, την ανάγκη επανεξέτασης των συστημάτων ενεργητικής ψύξης και τη δυνατότητα σύνδεσης των παρεμβάσεων στο κτίριο με το μικροκλίμα του γειτονικού αύλειου χώρου. Η σύγκλιση αυτή δείχνει ότι το κοινό πληροφοριακό πακέτο και τα συγκεκριμένα ζητούμενα διαμόρφωσαν ένα σταθερό πλαίσιο ανάλυσης.

Οι βασικές διαφορές εντοπίστηκαν στον τρόπο με τον οποίο οι κοινοί άξονες μετατράπηκαν σε προτάσεις. Το ChatGPT ακολούθησε περισσότερο σταδιακή και διερευνητική λογική. Έδωσε προτεραιότητα στην αποτύπωση, στον λειτουργικό έλεγχο, στη συντήρηση, στις μετρήσεις και στις πιλοτικές εφαρμογές. Οι σύνθετες παρεμβάσεις διατυπώθηκαν συχνότερα υπό προϋποθέσεις και συνδέθηκαν με τα δεδομένα που έπρεπε να συλλεχθούν πριν από την οριστικοποίησή τους.

Το Gemini χρησιμοποίησε περισσότερο άμεση και αντικειμενοποιημένη σχεδιαστική γλώσσα. Πρότεινε συγκεκριμένα νέα στοιχεία, υλικά και κατασκευαστικές μεταβολές, οι οποίες μπορούσαν να οπτικοποιηθούν ευκολότερα. Η συγκεκριμενοποίηση αυτή ενίσχυσε τη χρησιμότητά του ως εργαλείου ιδεοπαραγωγής, αλλά αύξησε την εξάρτηση από παραδοχές που δεν είχαν επιβεβαιωθεί από τα διαθέσιμα δεδομένα.

Διαφορά εμφανίστηκε και στην έκταση των παρεμβάσεων. Το ChatGPT διατήρησε περισσότερο σαφή σύνδεση με την οριοθετημένη νότια ζώνη και πρότεινε περιορισμένες επεμβάσεις στον άμεσα γειτονικό αύλειο χώρο. Το Gemini, ιδίως στο ολοκληρωμένο σενάριο, διεύρυνε την κλίμακα της επέμβασης με εκτενέστερη αντικατάσταση των υλικών της αυλής και περισσότερο εμφανείς μεταβολές στα ανοίγματα και στις εγκαταστάσεις.

Ως προς την ιεράρχηση, το ChatGPT προέκρινε ενέργειες που θα παρήγαγαν πρώτα καλύτερη γνώση της υφιστάμενης κατάστασης, όπως τον έλεγχο των κουφωμάτων, των συστημάτων σκίασης, των διαδρομών αερισμού και των κλιματιστικών μονάδων. Το Gemini έδωσε μεγαλύτερη βαρύτητα σε παρεμβάσεις με περισσότερο άμεσο βιοκλιματικό ή μορφολογικό αποτέλεσμα. Κατά τον κριτικό αυτοέλεγχο, πάντως, αναγνώρισε ότι ορισμένες από τις προτάσεις του, όπως τα νέα παντζούρια στον όροφο και οι εκτενείς επεμβάσεις στην αυλή, παρουσίαζαν αυξημένη αβεβαιότητα.

Η απάντηση στο τρίτο ερευνητικό ερώτημα είναι ότι τα μοντέλα συνέκλιναν κυρίως ως προς το **τι** πρέπει να εξεταστεί, αλλά διαφοροποιήθηκαν ως προς το **πώς**, το **πότε** και υπό ποιες προϋποθέσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν οι παρεμβάσεις. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες της έρευνας, το ChatGPT έδωσε μεγαλύτερη έμφαση στη διαδικασία τεκμηρίωσης και σταδιακής ωρίμανσης, ενώ το Gemini στη σαφήνεια και στη συγκεκριμένη μορφή των σχεδιαστικών λύσεων.

7.2.4 Σε ποιον βαθμό τα τέσσερα σενάρια ανταποκρίθηκαν στα πέντε κριτήρια αξιολόγησης;

Ως προς την **αξιοποίηση του διαθέσιμου πληροφοριακού υλικού**, και τα τέσσερα σενάρια συνδέθηκαν με συγκεκριμένα στοιχεία του κτιρίου. Τα δύο σενάρια του ChatGPT έλαβαν βαθμολογία 5/5, επειδή οι προτάσεις τους αναφέρονταν συστηματικά στα διαθέσιμα σχέδια, στις φωτογραφίες και στις τεχνικές πληροφορίες και διατηρούσαν σαφή διάκριση μεταξύ γνωστών και άγνωστων παραμέτρων. Τα δύο σενάρια του Gemini έλαβαν 4/5, καθώς αξιοποίησαν ουσιαστικά το ίδιο υλικό, αλλά ορισμένες προτάσεις προχώρησαν πέρα από όσα μπορούσαν να τεκμηριωθούν με ασφάλεια.

Ως προς τη **βιοκλιματική καταλληλότητα**, όλα τα σενάρια περιλάμβαναν εύλογες παρεμβάσεις για την ηλιοπροστασία, τον φωτισμό, τον αερισμό, την ψύξη και το υπαίθριο μικροκλίμα. Το ελάχιστο σενάριο του ChatGPT βαθμολογήθηκε με 4/5 και το ολοκληρωμένο με 5/5, καθώς το δεύτερο ανέπτυξε περισσότερο συστηματικά τις

αλληλεπιδράσεις των παρεμβάσεων. Τα δύο σενάρια του Gemini βαθμολογήθηκαν με 4/5, επειδή περιλάμβαναν κατάλληλες βιοκλιματικές κατευθύνσεις, αλλά ανέπτυξαν λιγότερο τις πιθανές αλληλεξαρτήσεις και τα αντισταθμιστικά αποτελέσματα μεταξύ διαφορετικών λύσεων.

Ως προς την **τεχνική εφαρμοσιμότητα**, τα δύο ελάχιστα σενάρια έλαβαν 4/5, καθώς βασίστηκαν κυρίως σε ελέγχους, συντηρήσεις και περιορισμένες παρεμβάσεις. Τα δύο ολοκληρωμένα σενάρια έλαβαν 3/5, επειδή η εφαρμογή νέων εξωτερικών στοιχείων, η αποκατάσταση των διαδρομών αερισμού, η αναδιοργάνωση της ψύξης και οι εκτεταμένες παρεμβάσεις στην αυλή απαιτούν ακριβέστερη αποτύπωση, στατικό και ηλεκτρομηχανολογικό έλεγχο, ενεργειακή μελέτη και διερεύνηση των δικτύων και των απορροών.

Ως προς την **αρχιτεκτονική συμβατότητα**, το ελάχιστο σενάριο του ChatGPT έλαβε 5/5, επειδή στηρίχθηκε κυρίως στη συντήρηση και στην επαναλειτουργία υφιστάμενων στοιχείων. Το ολοκληρωμένο σενάριό του έλαβε 4/5, καθώς τα νέα στοιχεία ηλιοπροστασίας και η πιθανή αναδιοργάνωση των εγκαταστάσεων μπορούσαν να επηρεάσουν τη λιθοδομή και τον ρυθμό των ανοιγμάτων. Το ελάχιστο σενάριο του Gemini έλαβε 4/5, ενώ το ολοκληρωμένο 3/5, λόγω των νέων παντζουριών, των μεταβολών στα κουφώματα, της ενσωμάτωσης των πλεγμάτων και της ευρύτερης αναδιαμόρφωσης της αυλής.

Ως προς την **τεκμηρίωση και την αναγνώριση των περιορισμών**, τα δύο σενάρια του ChatGPT έλαβαν 5/5. Το μοντέλο κατέγραψε συστηματικά τις μη διαθέσιμες πληροφορίες, τις απαιτούμενες μετρήσεις και τις τεχνικές προϋποθέσεις κάθε σύνθετης παρέμβασης. Τα δύο σενάρια του Gemini έλαβαν 3/5, καθώς αναγνώρισαν σημαντικές αβεβαιότητες, ιδίως κατά τον τελικό αυτοέλεγχο, αλλά ορισμένες αρχικές προτάσεις είχαν παρουσιαστεί με μεγαλύτερη βεβαιότητα από όση επέτρεπε το διαθέσιμο υλικό.

Οι συνολικές βαθμολογίες ήταν 23/25 και 22/25 για το ελάχιστο και το ολοκληρωμένο σενάριο του ChatGPT και 19/25 και 17/25 για τα αντίστοιχα σενάρια του Gemini. Οι βαθμολογίες αυτές αποτελούν ποιοτική αποτίμηση βάσει του ειδικού πλαισίου της παρούσας μελέτης και δεν συνιστούν αντικειμενική, στατιστικά επικυρωμένη ή γενικεύσιμη μέτρηση της συνολικής απόδοσης των δύο εφαρμογών.

Το τέταρτο ερευνητικό ερώτημα απαντάται ότι και τα τέσσερα σενάρια ανταποκρίθηκαν ικανοποιητικά στον στόχο της προκαταρκτικής παραγωγής και σύγκρισης εναλλακτικών κατευθύνσεων, αλλά όχι με την ίδια πληρότητα σε όλα τα κριτήρια. Η ισχυρότερη ανταπόκριση εμφανίστηκε στην αξιοποίηση του πληροφοριακού υλικού και στη διαμόρφωση βιοκλιματικά εύλογων προτάσεων. Η ασθενέστερη πλευρά ήταν η τεχνική και ποσοτική επιβεβαίωση, κυρίως στα ολοκληρωμένα σενάρια. Η ποιότητα μιας απάντησης δεν κρίθηκε μόνο από τον αριθμό ή τη συγκεκριμενοποίηση των προτάσεων, αλλά από τη σύνδεσή τους με τα πραγματικά δεδομένα, την αναγνώριση των τεχνικών προϋποθέσεων και τη σαφή δήλωση των ορίων τους.

7.3 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία έδειξε ότι το ChatGPT και το Gemini μπορούν να υποστηρίξουν την προκαταρκτική διερεύνηση ενός σύνθετου αρχιτεκτονικού προβλήματος, όταν τους παρέχεται σαφώς οργανωμένο πληροφοριακό υλικό και συγκεκριμένο πλαίσιο ζητούμενων. Τα δύο εργαλεία αξιοποίησαν αρχιτεκτονικά σχέδια, φωτογραφίες και τεχνικές πληροφορίες για τη νότια ζώνη του Παπαστρατείου Δημοτικού Σχολείου και παρήγαγαν διακριτά σενάρια ελάχιστης και ολοκληρωμένης παρέμβασης. Οι απαντήσεις τους συνδέθηκαν με πραγματικά χαρακτηριστικά του κτιρίου και κάλυψαν βασικούς άξονες βιοκλιματικής αναβάθμισης, όπως η ηλιοπροστασία, ο φυσικός φωτισμός, ο αερισμός, η ενεργητική ψύξη και η σχέση του κτιρίου με τον γειτονικό αύλειο χώρο.

Η σύγκριση ανέδειξε ότι η χρησιμότητα των μοντέλων δεν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό ή τη συγκεκριμενοποίηση των προτάσεων. Το ChatGPT παρουσίασε περισσότερο σταδιακή και επιφυλακτική λογική, δίνοντας έμφαση στην καταγραφή, στη συντήρηση και στην ανάγκη πρόσθετης τεκμηρίωσης. Το Gemini παρήγαγε περισσότερο άμεσες και εύκολα οπτικοποιήσιμες λύσεις, οι οποίες μπορούσαν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά την ιδεοπαραγωγή, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις στηρίχθηκαν σε παραδοχές που δεν επιβεβαιώνονταν από το διαθέσιμο υλικό. Η διαφοροποίηση αυτή δεν τεκμηριώνει γενική υπεροχή του ενός συστήματος, αλλά δείχνει ότι διαφορετικοί τρόποι απόκρισης μπορεί να είναι χρήσιμοι σε διαφορετικά στάδια της σχεδιαστικής διαδικασίας.

Παράλληλα, τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τα όρια των μεγάλων γλωσσικών μοντέλων σε ζητήματα τεχνικής και αρχιτεκτονικής εφαρμογής. Χωρίς επιτόπιες μετρήσεις, πλήρη

αποτύπωση, ενεργειακές και μικροκλιματικές προσομοιώσεις, στατικό και ηλεκτρομηχανολογικό έλεγχο και διερεύνηση του θεσμικού καθεστώτος του κτιρίου, καμία σύνθετη παρέμβαση δεν μπορεί να θεωρηθεί έτοιμη προς εφαρμογή. Ο κριτικός αυτοέλεγχος των μοντέλων συνέβαλε στην αναγνώριση ορισμένων αβεβαιοτήτων, αλλά δεν αποτέλεσε ανεξάρτητη επιβεβαίωση της τεχνικής ορθότητας των προτάσεων. Η ανθρώπινη εποπτεία παραμένει αναγκαία από το στάδιο επιλογής και οργάνωσης των δεδομένων έως την τελική αξιολόγηση και εξειδίκευση της λύσης.

Συνολικά, η παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί να ενισχύσει την πρώτη φάση του βιώσιμου αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, επιταχύνοντας τη σύνθεση ετερογενών πληροφοριών, διευρύνοντας το πεδίο των εναλλακτικών επιλογών και βοηθώντας στον εντοπισμό των δεδομένων και των ελέγχων που απαιτούνται στη συνέχεια. Για το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο, η περισσότερο ασφαλής κατεύθυνση είναι μια σταδιακή διαδικασία που θα ξεκινά από την τεκμηρίωση και τη συντήρηση της υφιστάμενης κατάστασης, θα συνεχίζεται με στοχευμένες μετρήσεις και πιλοτικές παρεμβάσεις και θα οδηγεί σε εκτενέστερη αναβάθμιση μόνο εφόσον αυτή υποστηρίζεται από επαρκή τεχνικά και αρχιτεκτονικά δεδομένα. Τα σενάρια της ΤΝ μπορούν, επομένως, να λειτουργήσουν ως οργανωμένη αφετηρία διερεύνησης και όχι ως υποκατάστατο της ολοκληρωμένης μελέτης και της επαγγελματικής ευθύνης.

7.4 Περιορισμοί της έρευνας, αναπάντητα ερωτήματα και αδυναμίες της εργασίας

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη ορισμένους μεθοδολογικούς, τεχνικούς και πρακτικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν τη χρησιμότητα της έρευνας, αλλά οριοθετούν το είδος των συμπερασμάτων που μπορούν να εξαχθούν και δεν επιτρέπουν τη μετατροπή των σεναρίων σε τελικές προτάσεις εφαρμογής.

Ο πρώτος περιορισμός αφορά την επιλογή μίας μόνο μελέτης περίπτωσης. Η έρευνα επικεντρώθηκε στο Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο Αγρινίου και ειδικότερα στη νότια ζώνη του ενός σχολικού κτιρίου. Η συγκεκριμένη οριοθέτηση επέτρεψε τη σε βάθος εξέταση ενός πραγματικού αρχιτεκτονικού προβλήματος, αλλά περιορίζει τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων σε άλλες σχολικές μονάδες. Διαφορετικά κτίρια μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικό προσανατολισμό, μορφολογία, υλικά, κατάσταση διατήρησης, κλιματικές συνθήκες και λειτουργικές ανάγκες. Επομένως, δεν μπορεί να

θεωρηθεί δεδομένο ότι τα ίδια μοντέλα θα παρήγαγαν αντίστοιχης ποιότητας αποτελέσματα σε μία νεότερη σχολική κατασκευή, σε ένα κτίριο άλλης κλιματικής ζώνης ή σε μία περίπτωση χωρίς ιστορικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Η χωρική οριοθέτηση στη νότια όψη, στις άμεσα συνδεδεμένες αίθουσες και σε τμήμα του γειτονικού αύλειου χώρου αποτέλεσε επίσης περιορισμό. Το σχολικό κτίριο λειτουργεί ως ενιαίο σύστημα και η επέμβαση σε μία ζώνη μπορεί να επηρεάζεται από τη συνολική κυκλοφορία του αέρα, τη χρήση των υπόλοιπων χώρων, τη λειτουργία των εγκαταστάσεων και τη διαμόρφωση ολόκληρης της αυλής. Στην παρούσα έρευνα δεν εξετάστηκε συνολικά το σχολικό συγκρότημα ούτε αξιολογήθηκαν οι πιθανές επιδράσεις των προτάσεων σε όλες τις αίθουσες και λειτουργίες του. Η επιλογή αυτή ήταν αναγκαία για τη διατήρηση ενός διαχειρίσιμου ερευνητικού πεδίου, αλλά δεν επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συνολική ενεργειακή ή περιβαλλοντική συμπεριφορά του σχολείου.

Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς ήταν η απουσία επιτόπιων μετρήσεων. Δεν υπήρχαν διαθέσιμες χρονοσειρές εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, συγκέντρωσης CO₂, ταχύτητας ή παροχής αέρα και επιπέδων φυσικού φωτισμού. Δεν ήταν επίσης διαθέσιμες μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας της ασφάλτου, της λιθοδομής και των υπόλοιπων υλικών του αύλειου χώρου. Κατά συνέπεια, προβλήματα όπως η υπερθέρμανση των νότιων αιθουσών, η ανεπαρκής ανανέωση του αέρα ή η μικροκλιματική επίδραση των σκληρών επιφανειών αντιμετωπίστηκαν ως εύλογες πιθανότητες και όχι ως ποσοτικά επιβεβαιωμένες καταστάσεις.

Η απουσία ενεργειακών και περιβαλλοντικών προσομοιώσεων αποτέλεσε συναφή περιορισμό. Τα σενάρια δεν εισήχθησαν σε λογισμικό δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης, φυσικού φωτισμού, αερισμού ή μικροκλιματικής ανάλυσης. Επομένως, δεν ήταν δυνατόν να συγκριθούν μέσω δεικτών όπως οι ώρες υπερθέρμανσης, η ενεργειακή κατανάλωση, τα ψυκτικά φορτία, η επάρκεια φυσικού φωτισμού ή οι μεταβολές της θερμικής άνεσης. Η αξιολόγηση της βιοκλιματικής καταλληλότητας πραγματοποιήθηκε σε ποιοτικό επίπεδο, με βάση τις αρχές που αναπτύχθηκαν στο θεωρητικό μέρος και τη λογική συνέπεια των προτάσεων. Για τον λόγο αυτό, οι βαθμολογίες δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως υπολογιστική απόδειξη της απόδοσης των σεναρίων.

Περιορισμένη ήταν και η πληροφόρηση για τα τεχνικά συστήματα του κτιρίου. Παρότι επιβεβαιώθηκε η παρουσία κεντρικής θέρμανσης, ανεμιστήρων και επιμέρους κλιματιστικών μονάδων, δεν ήταν γνωστά ο ακριβής αριθμός τους, η ισχύς, η ηλικία, η ενεργειακή κατηγορία, το πρόγραμμα λειτουργίας, η κατάσταση συντήρησης και η κατανάλωση ενέργειας. Επομένως, προτάσεις που αφορούσαν τη συντήρηση, την αντικατάσταση ή τη μεταφορά τους δεν μπορούσαν να αξιολογηθούν ολοκληρωμένα. Η ορατή παρουσία μονάδων και δικτύων επέτρεψε τη μορφολογική τους εξέταση, αλλά όχι την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για την ενεργειακή τους απόδοση.

Αντίστοιχη αβεβαιότητα υπήρχε για τα κουφώματα, τους υαλοπίνακες, τις οπές αερισμού και τη λιθοδομή. Οι φωτογραφίες και τα σχέδια τεκμηριώναν τη μορφή και τη θέση τους, αλλά όχι πλήρως την κατασκευαστική κατάσταση, την αεροστεγανότητα, τη θερμική απόδοση, τη στατική επάρκεια ή τη δυνατότητα αγκύρωσης νέων στοιχείων. Ιδιαίτερα στην περίπτωση των παλαιών διαδρομών αερισμού, η εξωτερική παρουσία γριλιών δεν αποδείκνυε τη συνέχεια, την καθαρότητα και τη σημερινή λειτουργικότητά τους. Επομένως, οι σχετικές προτάσεις παρέμεναν υποθέσεις προς τεχνική διερεύνηση και όχι επιβεβαιωμένες δυνατότητες εφαρμογής.

Επιπλέον, δεν είχε επιβεβαιωθεί πλήρως το καθεστώς θεσμικής ή αρχιτεκτονικής προστασίας του κτιρίου και οι ειδικοί περιορισμοί που ενδέχεται να διέπουν τις επεμβάσεις στις όψεις, στα κουφώματα και στη λιθοδομή. Η ιστορική και μορφολογική αξία του σχολείου ενσωματώθηκε ως βασικό κριτήριο αξιολόγησης, χωρίς όμως να πραγματοποιηθεί ειδική μελέτη αποκατάστασης ή έρευνα των αρμόδιων εγκρίσεων. Έτσι, μία πρόταση μπορεί να χαρακτηρίζεται προκαταρκτικά συμβατή με την υφιστάμενη αρχιτεκτονική και παρ' όλα αυτά να μην επιτρέπεται από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο.

Σημαντικός περιορισμός αφορά επίσης το είδος των εργαλείων που επιλέχθηκαν. Η έρευνα συνέκρινε δύο μεγάλα γλωσσικά μοντέλα και όχι εξειδικευμένα λογισμικά ενεργειακού ή παραμετρικού σχεδιασμού. Το ChatGPT και το Gemini μπορούν να συνθέτουν πληροφορίες και να παράγουν λεκτικά σενάρια, αλλά δεν διαθέτουν από μόνα τους την υπολογιστική λειτουργία ενός εργαλείου BIM, μιας μηχανής ενεργειακής προσομοίωσης ή ενός περιβάλλοντος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα αποτυπώνουν τις δυνατότητες της παραγωγικής γλωσσικής ΤΝ στην προκαταρκτική λήψη αποφάσεων και δεν μπορούν να γενικευθούν σε όλες τις κατηγορίες εφαρμογών ΤΝ στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Εξετάστηκαν, επίσης, μόνο δύο εφαρμογές και συγκεκριμένες εκδόσεις τους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τα εμπορικά μοντέλα παραγωγικής ΤΝ ανανεώνονται συχνά και οι αλλαγές στην εκπαίδευση, στις πολυτροπικές δυνατότητες και στους μηχανισμούς συλλογισμού μπορούν να μεταβάλουν αισθητά το αποτέλεσμα. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα δεν καταλήγει σε διαχρονική και απόλυτη κατάταξη του ChatGPT και του Gemini. Τα συμπεράσματα αφορούν τη συμπεριφορά των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες και με το συγκεκριμένο πληροφοριακό υλικό.

Η επίδραση του prompting αποτελεί έναν ακόμη περιορισμό. Οι απαντήσεις των μοντέλων εξαρτήθηκαν από τον τρόπο με τον οποίο διατυπώθηκαν τα ερωτήματα, από τη διάκριση σε ελάχιστο και ολοκληρωμένο σενάριο και από την απαίτηση να αναγνωρίζονται τα δεδομένα, οι υποθέσεις και τα ελλείποντα στοιχεία. Διαφορετική σειρά prompts ή διαφορετικό επίπεδο λεπτομέρειας θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε διαφορετικές προτάσεις. Επομένως, η απόδοση δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στο ίδιο το μοντέλο, αλλά στο σύνολο της αλληλεπίδρασης μεταξύ πληροφοριακού πακέτου, ερευνητικού σχεδιασμού και συστήματος ΤΝ.

Περιορισμούς παρουσιάζει και η αξιολόγηση των σεναρίων. Η βαθμολόγηση πραγματοποιήθηκε σε πενταβάθμια κλίμακα και βασίστηκε σε πέντε ισοβαρή κριτήρια. Η ίση στάθμιση επιλέχθηκε για λόγους σαφήνειας και συγκρισιμότητας, αλλά δεν σημαίνει ότι όλα τα κριτήρια έχουν την ίδια βαρύτητα σε μία πραγματική τεχνική απόφαση. Για παράδειγμα, η ασφάλεια, η στατική δυνατότητα και η συμμόρφωση με το θεσμικό πλαίσιο μπορεί στην πράξη να υπερισχύουν του πιθανού βιοκλιματικού οφέλους. Επίσης, η διαφορά ενός βαθμού σε μία ποιοτική κλίμακα δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως ακριβές αριθμητικό μέτρο υπεροχής.

Από τη διαδικασία απουσίαζε ακόμη η συστηματική συμμετοχή των χρηστών του σχολείου. Εκπαιδευτικοί, μαθητές, διοίκηση, προσωπικό συντήρησης και γονείς δεν συμμετείχαν στην αξιολόγηση των προβλημάτων και των προτάσεων. Ως αποτέλεσμα, ζητήματα όπως η καθημερινή χρήση των κουρτινών και των παραθύρων, η αντιληπτή θερμική άνεση, τα προβλήματα θάμβωσης, ο θόρυβος, η επιτήρηση της αυλής και οι πραγματικές ανάγκες συντήρησης δεν εξετάστηκαν μέσα από την εμπειρία των χρηστών. Η τεχνική και βιοκλιματική καταλληλότητα δεν αρκεί από μόνη της για την επιτυχία μιας

σχολικής παρέμβασης, εάν η λύση δεν είναι αποδεκτή, κατανοητή και λειτουργική για όσους χρησιμοποιούν το κτίριο.

Τέλος, η έρευνα δεν εξέτασε αναλυτικά το κόστος, τον χρόνο υλοποίησης, τη διαθεσιμότητα υλικών, τη συντήρηση σε βάθος χρόνου και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής των προτεινόμενων κατασκευών. Η αποφυγή ακριβών εκτιμήσεων κόστους και εξοικονόμησης ήταν συνειδητή, επειδή δεν υπήρχαν οι απαραίτητες ποσότητες, προδιαγραφές και τιμές. Αυτό σημαίνει ότι μία παρέμβαση που αξιολογήθηκε θετικά από βιοκλιματική ή μορφολογική άποψη μπορεί να αποδειχθεί οικονομικά δυσανάλογη ή δύσκολη στη συντήρηση. Αντίστοιχα, δεν εξετάστηκε αν η ενσωματωμένη ενέργεια και το περιβαλλοντικό κόστος νέων υλικών αντισταθμίζονται από το πιθανό λειτουργικό όφελος.

Συνολικά, οι παραπάνω περιορισμοί δείχνουν ότι τα αποτελέσματα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως διερεύνηση των δυνατοτήτων και των αδυναμιών της παραγωγικής ΤΝ σε ένα πρώιμο στάδιο σχεδιασμού. Η εργασία δεν αποδεικνύει ότι κάποια από τις παρεμβάσεις πρέπει να εφαρμοστεί ούτε ότι τα δύο μοντέλα μπορούν να αντικαταστήσουν μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική και τεχνική μελέτη. Τεκμηριώνει, όμως, ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την οργάνωση του προβλήματος, την παραγωγή εναλλακτικών και τον προσδιορισμό των δεδομένων που απαιτούνται πριν από τη λήψη μιας πραγματικής απόφασης.

7.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και πρακτική εφαρμογή

Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας δημιουργούν ένα σύνολο κατευθύνσεων τόσο για τη συνέχιση της έρευνας όσο και για την περισσότερο υπεύθυνη αξιοποίηση της παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης σε πραγματικές διαδικασίες βιοκλιματικού επανασχεδιασμού. Η μελλοντική διερεύνηση δεν πρέπει να περιοριστεί στην παραγωγή περισσότερων προτάσεων από διαφορετικά μοντέλα. Χρειάζεται να εξετάσει συστηματικότερα τη σταθερότητα των αποτελεσμάτων, τη σύνδεσή τους με μετρήσιμα δεδομένα, την τεχνική τους επαλήθευση και τον τρόπο με τον οποίο εντάσσονται στη συνεργασία μεταξύ ανθρώπων και υπολογιστικών εργαλείων.

7.5.1 Διεύρυνση των μελετών περίπτωσης

Πρώτη κατεύθυνση αποτελεί η επανάληψη της έρευνας σε μεγαλύτερο αριθμό σχολικών κτιρίων. Η εφαρμογή του ίδιου πρωτοκόλλου σε διαφορετικές περιπτώσεις θα επέτρεπε να

εξεταστεί αν τα μοντέλα παράγουν σταθερά προσαρμοσμένες λύσεις ή αν επαναλαμβάνουν γενικές κατευθύνσεις ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά κάθε κτιρίου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η επιλογή σχολείων που διαφοροποιούνται ως προς:

- την περίοδο κατασκευής,
- το κτιριακό σύστημα και τα υλικά,
- τον προσανατολισμό και τη μορφολογία,
- την κλιματική ζώνη,
- το μέγεθος και την οργάνωση της αυλής,
- το καθεστώς αρχιτεκτονικής προστασίας,
- την κατάσταση συντήρησης και τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις.

Μία τέτοια διεύρυνση θα επέτρεπε να διαπιστωθεί σε ποιες κατηγορίες προβλημάτων η παραγωγική ΤΝ παρουσιάζει μεγαλύτερη χρησιμότητα. Είναι πιθανό, για παράδειγμα, ένα μοντέλο να αποδίδει καλύτερα σε περιπτώσεις όπου το κτίριο διαθέτει σαφή γεωμετρική τεκμηρίωση και λιγότερο αποτελεσματικά όταν οι πληροφορίες είναι αποσπασματικές ή όταν οι επεμβάσεις εξαρτώνται από ιδιαίτερα σύνθετους ιστορικούς περιορισμούς.

Παράλληλα, η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κλιματικών περιοχών θα μπορούσε να δείξει αν τα μοντέλα προσαρμόζουν πραγματικά τις προτάσεις τους στις τοπικές συνθήκες. Η ηλιοπροστασία, ο φυσικός αερισμός, η θερμική μάζα και η χρήση της αυλής δεν έχουν την ίδια σημασία σε όλες τις περιοχές. Επομένως, η γενίκευση μιας πρότασης χωρίς επαρκή κλιματική διαφοροποίηση θα αποτελούσε ένδειξη περιορισμένης προσαρμοστικότητας.

7.5.2 Εξέταση περισσότερων μοντέλων και επαναλαμβανόμενων εκτελέσεων

Μία δεύτερη κατεύθυνση αφορά τη σύγκριση περισσότερων εφαρμογών παραγωγικής ΤΝ. Η παρούσα εργασία εξέτασε δύο μοντέλα, τα οποία εκπροσωπούν σημαντικές αλλά όχι τις μοναδικές διαθέσιμες τεχνολογικές προσεγγίσεις. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εντάξουν περισσότερα μεγάλα γλωσσικά ή πολυτροπικά μοντέλα και να εξετάσουν αν παρατηρούνται σταθερές διαφορές ως προς:

- την αξιοποίηση τεχνικών δεδομένων,
- την κατανόηση σχεδίων και φωτογραφιών,
- τη συγκεκριμενοποίηση των λύσεων,

- την αναγνώριση της αβεβαιότητας,
- την τεχνική επιφυλακτικότητα,
- την αρχιτεκτονική ευαισθησία,
- την ποιότητα του κριτικού αυτοελέγχου.

Η διαδικασία πρέπει επίσης να επαναλαμβάνεται σε περισσότερες από μία ανεξάρτητες συνομιλίες ανά μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η σταθερότητα των απαντήσεων και να διαπιστωθεί αν τα ίδια δεδομένα οδηγούν σε παρόμοιες προτάσεις και ιεραρχήσεις. Η αξιολόγηση μίας μόνο εκτέλεσης μπορεί να επηρεάζεται από τη στοχαστική φύση της παραγωγής και δεν αρκεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη γενική συμπεριφορά ενός συστήματος.

Σε μία περισσότερο συστηματική πειραματική διάταξη θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν πολλαπλές εκτελέσεις με το ίδιο prompt και να καταγραφούν:

1. οι παρεμβάσεις που επανεμφανίζονται,
2. οι προτάσεις που αλλάζουν συχνά,
3. η μεταβλητότητα της ιεράρχησης,
4. η συνέπεια στην αναγνώριση των περιορισμών,
5. η συχνότητα μη τεκμηριωμένων ισχυρισμών.

Έτσι, η αξιολόγηση δεν θα αφορούσε μόνο την ποιότητα μίας απάντησης, αλλά και την αξιοπιστία της διαδικασίας παραγωγής.

7.5.3 Διερεύνηση της επίδρασης του prompting

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μορφή των οδηγιών επηρεάζει ουσιαστικά την ποιότητα και τον βαθμό επιφυλακτικότητας των απαντήσεων. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να συγκρίνει διαφορετικές τεχνικές prompting, διατηρώντας σταθερό το ίδιο κτίριο και το ίδιο πληροφοριακό υλικό.

Θα μπορούσαν, για παράδειγμα, να συγκριθούν:

- ένα γενικό prompt χωρίς ειδικούς περιορισμούς,
- ένα αναλυτικό prompt με σαφή κριτήρια,
- ένα διαδοχικό πρωτόκολλο ανάλυσης, παραγωγής και αυτοελέγχου,
- ένα prompt που ζητά ρητές παραπομπές σε κάθε στοιχείο του πληροφοριακού πακέτου,

- μία διαδικασία όπου το μοντέλο υποχρεώνεται να ζητήσει πρώτα πρόσθετα δεδομένα πριν προτείνει λύσεις,
- μία προσέγγιση πολλαπλών ρόλων, στην οποία το ίδιο μοντέλο εξετάζει διαδοχικά το πρόβλημα από τη θέση του αρχιτέκτονα, του μηχανολόγου, του ειδικού αποκατάστασης και του υπεύθυνου σχολικής ασφάλειας.

Η σύγκριση αυτή θα μπορούσε να δείξει ποια δομή οδηγιών περιορίζει περισσότερο τις μη τεκμηριωμένες παραδοχές. Θα ήταν επίσης δυνατόν να εξεταστεί αν η απαίτηση αυτοελέγχου πρέπει να εφαρμόζεται μόνο στο τέλος ή μετά από κάθε στάδιο παραγωγής.

Μία ακόμη χρήσιμη κατεύθυνση θα ήταν η ανάπτυξη τυποποιημένων prompts για συγκεκριμένες κατηγορίες κτιριακής αξιολόγησης. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο θα μπορούσε να περιλαμβάνει υποχρεωτικά πεδία για τα διαθέσιμα τεκμήρια, τις υποθέσεις, τα ελλείποντα δεδομένα, τους τεχνικούς κινδύνους και την επίδραση στην αρχιτεκτονική φυσιογνωμία. Η τυποποίηση δεν θα εξασφάλιζε από μόνη της την ορθότητα, αλλά θα ενίσχυε τη συγκρισιμότητα και την ιχνηλασιμότητα των απαντήσεων.

7.5.4 Σύνδεση με μετρήσεις και ενεργειακές προσομοιώσεις

Η σημαντικότερη ίσως συνέχεια της παρούσας έρευνας είναι η σύνδεση των λεκτικών σεναρίων με πραγματικά δεδομένα περιβαλλοντικής απόδοσης. Τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να προτείνουν ότι μία παρέμβαση είναι πιθανό να βελτιώσει τη θερμική άνεση ή τον φυσικό φωτισμό, αλλά δεν μπορούν να αποδείξουν το αποτέλεσμα χωρίς μετρήσεις ή υπολογιστική αξιολόγηση.

Μία επόμενη έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει εποχικές μετρήσεις:

- εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας,
- σχετικής υγρασίας,
- συγκέντρωσης CO₂,
- ταχύτητας και παροχής αέρα,
- επιπέδων φυσικού φωτισμού,
- επιφανειακών θερμοκρασιών,
- ωρών λειτουργίας των κλιματιστικών,
- ηλεκτρικής και θερμικής κατανάλωσης.

Οι μετρήσεις θα επέτρεπαν να επιβεβαιωθεί ποια από τα προβλήματα που εντόπισαν τα μοντέλα είναι πραγματικά σημαντικά και σε ποιους χώρους ή χρονικές περιόδους εμφανίζονται. Θα ήταν, επίσης, δυνατή η αναθεώρηση της ιεράρχησης των παρεμβάσεων. Για παράδειγμα, εάν οι μετρήσεις δεν έδειχναν σημαντική υπερθέρμανση σε ορισμένες αίθουσες, ένα νέο σύστημα εξωτερικής σκίασης μπορεί να μην αποτελούσε υψηλή προτεραιότητα. Αντίθετα, υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ θα μπορούσαν να καταστήσουν την αποκατάσταση του αερισμού περισσότερο επείγουσα.

Παράλληλα, τα προτεινόμενα σενάρια μπορούν να μεταφερθούν σε λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης, ανάλυσης φυσικού φωτισμού ή μικροκλίματος. Η λογική του performance-driven σχεδιασμού βασίζεται ακριβώς στη σύνδεση των εναλλακτικών λύσεων με συγκεκριμένους δείκτες απόδοσης και στην επαναλαμβανόμενη σύγκρισή τους (Huang et al., 2025; Suphavarophas et al., 2024). Στην περίπτωση αυτή, η TN θα μπορούσε να χρησιμοποιείται για την παραγωγή αρχικών εναλλακτικών, ενώ η προσομοίωση θα λειτουργούσε ως εξωτερικός μηχανισμός ελέγχου και ανατροφοδότησης.

7.5.5 Σύνδεση των γλωσσικών μοντέλων με BIM και δομημένες πηγές

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να ενισχυθεί σημαντικά μέσω της σύνδεσης των μεγάλων γλωσσικών μοντέλων με δομημένα δεδομένα BIM ή IFC. Στην παρούσα εργασία, το κτιριακό υλικό μετατράπηκε σε οργανωμένο πληροφοριακό πακέτο, αλλά δεν υπήρχε ένα πλήρως δομημένο ψηφιακό μοντέλο από το οποίο το εργαλείο να μπορεί να ανακτήσει με ακρίβεια διαστάσεις, προσανατολισμούς, επιφάνειες, υλικά και ιδιότητες.

Το BIM μπορεί να λειτουργήσει ως περισσότερο αξιόπιστο «έδαφος δεδομένων», ενώ το γλωσσικό μοντέλο ως μέσο πρόσβασης και επεξεργασίας της πληροφορίας. Η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει τη δυνατότητα των LLMs να λειτουργούν ως γλωσσική διεπαφή για την αναζήτηση σε BIM δεδομένα, την αναγνώριση ασυνεπειών και την παραγωγή δομημένων αναφορών (Du et al., 2024; Zhang et al., 2025).

Σε μία μελλοντική εφαρμογή, το μοντέλο θα μπορούσε να αντλεί αυτόματα:

- τον προσανατολισμό κάθε ανοίγματος,
- τις πραγματικές διαστάσεις των κουφωμάτων,
- τα υλικά και τις στρώσεις του κελύφους,
- τις χρήσεις και τα ωράρια των χώρων,

- τις θέσεις των εγκαταστάσεων,
- τις επιφάνειες της αυλής,
- τους περιορισμούς προσβασιμότητας και ασφάλειας.

Η σύνδεση αυτή θα περιόριζε τον κίνδυνο να στηρίζονται οι προτάσεις σε γενικές ή λανθασμένες αντιλήψεις για τη γεωμετρία του κτιρίου. Παράλληλα, θα επέτρεπε την αυτόματη μεταφορά των εναλλακτικών σε περιβάλλον προσομοίωσης και τη δημιουργία ενός περισσότερο ελεγχόμενου βρόχου παραγωγής και αξιολόγησης.

7.5.6 Αξιολόγηση από διεπιστημονική ομάδα ειδικών

Η μελλοντική έρευνα πρέπει να περιλαμβάνει ανεξάρτητη αξιολόγηση από περισσότερες τεχνικές ειδικότητες. Η βιώσιμη αναβάθμιση ενός ιστορικού σχολικού κτιρίου δεν μπορεί να αξιολογηθεί αποκλειστικά από μία οπτική. Απαιτεί τη συνεργασία αρχιτέκτονα, μηχανολόγου, πολιτικού μηχανικού, ειδικού βιοκλιματικού σχεδιασμού, ειδικού αποκατάστασης, ηλεκτρολόγου και, όπου χρειάζεται, αρχιτέκτονα τοπίου.

Κάθε ειδικότητα θα μπορούσε να αξιολογεί διαφορετικές διαστάσεις:

- ο αρχιτέκτονας τη λειτουργική και μορφολογική ένταξη,
- ο μηχανολόγος τα συστήματα αερισμού, ψύξης και ενεργειακής λειτουργίας,
- ο πολιτικός μηχανικός τη δυνατότητα αγκυρώσεων και τις στατικές επιπτώσεις,
- ο ειδικός αποκατάστασης τη συμβατότητα με τα αυθεντικά στοιχεία,
- ο αρχιτέκτονας τοπίου τις παρεμβάσεις στην αυλή,
- ο ειδικός σχολικής ασφάλειας τις επιπτώσεις στην κυκλοφορία, την επιτήρηση και την εκκένωση.

Η χρήση πολλαπλών αξιολογητών θα επέτρεπε επίσης τον έλεγχο της συμφωνίας μεταξύ τους και θα περιόριζε την επίδραση της υποκειμενικής κρίσης. Η σύγκριση των προτάσεων της ΤΝ με ένα ανεξάρτητο σενάριο που θα είχε εκπονηθεί από επαγγελματίες θα παρείχε ένα σαφέστερο σημείο αναφοράς για την ποιότητα, την πληρότητα και την πρακτική αξία των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

7.5.7 Συμμετοχή των χρηστών του σχολείου

Μία ολοκληρωμένη διαδικασία βιώσιμου επανασχεδιασμού πρέπει να ενσωματώνει και την εμπειρία των χρηστών. Οι εκπαιδευτικοί και οι μαθητές γνωρίζουν πότε εμφανίζεται θάμβωση, ποιες αίθουσες θερμαίνονται περισσότερο, πώς χρησιμοποιούνται στην πράξη

τα παράθυρα και οι κουρτίνες και ποια προβλήματα προκαλούν οι εγκαταστάσεις ή ο θόρυβος.

Η συμμετοχή τους θα μπορούσε να οργανωθεί μέσω:

- δομημένων συνεντεύξεων,
- ερωτηματολογίων θερμικής και οπτικής άνεσης,
- περιπάτων παρατήρησης,
- εργαστηρίων συν-σχεδιασμού,
- χαρτογράφησης των προβληματικών σημείων,
- αξιολόγησης εναλλακτικών οπτικών ή χωρικών προτάσεων.

Τα δεδομένα αυτά θα εμπλούτιζαν το πληροφοριακό πακέτο και θα επέτρεπαν στα μοντέλα να ενσωματώσουν λειτουργικές και κοινωνικές παραμέτρους που δεν είναι ορατές στα σχέδια. Η συμμετοχική διάσταση είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις σχολικές αυλές, όπου η σκίαση, η φύτευση και οι αλλαγές στις επιστρώσεις επηρεάζουν όχι μόνο το μικροκλίμα αλλά και το παιχνίδι, την επιτήρηση, την προσβασιμότητα και την κοινωνική χρήση του χώρου.

7.5.8 Πιλοτική εφαρμογή και αξιολόγηση πριν και μετά την παρέμβαση

Οι προτάσεις χαμηλού κινδύνου μπορούν να δοκιμαστούν πιλοτικά πριν από μία γενικευμένη εφαρμογή. Η πιλοτική λογική είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για παρεμβάσεις όπως η καλύτερη χρήση των υφιστάμενων μέσων σκίασης, η εγκατάσταση προσωρινών στοιχείων σκίασης, η τοποθέτηση κινητής φύτευσης ή η εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών φυσικού αερισμού.

Μία πιλοτική εφαρμογή θα πρέπει να συνοδεύεται από μετρήσεις πριν και μετά, ώστε να εξετάζεται:

- η πραγματική θερμική επίδραση,
- η μεταβολή του φυσικού φωτισμού,
- η πιθανή θάμβωση,
- η ποιότητα του αέρα,
- η κατανάλωση ενέργειας,
- η αποδοχή από τους χρήστες,
- η ευκολία λειτουργίας και συντήρησης.

Η διαδικασία αυτή θα επέτρεπε τη μετατροπή της αρχικής ποιοτικής πρότασης σε εμπειρικά αξιολογημένη λύση. Παράλληλα, τα δεδομένα της πιλοτικής εφαρμογής θα μπορούσαν να επιστρέψουν στο μοντέλο ως νέα είσοδος, δημιουργώντας έναν επαναληπτικό κύκλο μεταξύ πρότασης, εφαρμογής, μέτρησης και αναθεώρησης.

7.5.9 Ενσωμάτωση κόστους, κύκλου ζωής και συντήρησης

Η μελλοντική αξιολόγηση πρέπει να υπερβεί τη βιοκλιματική και μορφολογική διάσταση και να συμπεριλάβει το κόστος και τον κύκλο ζωής. Μία παρέμβαση μπορεί να είναι αποτελεσματική ως προς τη σκίαση ή τον αερισμό, αλλά να απαιτεί υψηλό κόστος εγκατάστασης, συχνή συντήρηση ή αντικατάσταση υλικών με σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Για κάθε σενάριο θα μπορούσαν να εξετάζονται:

- το αρχικό κόστος,
- το κόστος συντήρησης,
- η αναμενόμενη διάρκεια ζωής,
- η δυνατότητα επισκευής και αντικατάστασης,
- η ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών,
- το ανθρακικό αποτύπωμα,
- η παραγωγή αποβλήτων,
- η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης.

Η ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων θα απέτρεπε την ταύτιση της βιωσιμότητας με τη λειτουργική ενεργειακή απόδοση. Μία νέα κατασκευή δεν αποτελεί απαραίτητα βιώσιμη επιλογή εάν απαιτεί σημαντικούς πόρους και αντικαθιστά υφιστάμενα στοιχεία που μπορούν να συντηρηθούν.

7.5.10 Προτεινόμενο πλαίσιο πρακτικής αξιοποίησης

Με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας, η χρήση παραγωγικής ΤΝ σε μία πραγματική διαδικασία αναβάθμισης θα μπορούσε να οργανωθεί σε έξι διαδοχικά στάδια.

Πρώτο στάδιο: συγκρότηση του πληροφοριακού πακέτου.

Συλλέγονται σχέδια, φωτογραφίες, τεχνικές εκθέσεις, πληροφορίες χρήσης, δεδομένα λειτουργίας, κλιματικά στοιχεία και θεσμικοί περιορισμοί. Τα στοιχεία διακρίνονται σε επιβεβαιωμένα δεδομένα, εκτιμήσεις και άγνωστες παραμέτρους.

Δεύτερο στάδιο: προκαταρκτική παραγωγή σεναρίων.

Ένα ή περισσότερα μοντέλα καλούνται να παράγουν διαφορετικά επίπεδα παρέμβασης με κοινά κριτήρια. Οι απαντήσεις πρέπει να περιλαμβάνουν όχι μόνο τη λύση, αλλά και το πρόβλημα που αντιμετωπίζει, τις προϋποθέσεις και τα απαιτούμενα πρόσθετα δεδομένα.

Τρίτο στάδιο: κριτικός έλεγχος.

Τα μοντέλα καλούνται να αναγνωρίσουν τις αβεβαιότητες και τις πιθανές ασυμβατότητες των προτάσεών τους. Ακολουθεί ανεξάρτητος έλεγχος από ειδικούς και απόρριψη των λύσεων που βασίζονται σε ανεπαρκή ή λανθασμένα δεδομένα.

Τέταρτο στάδιο: μετρήσεις και προσομοίωση.

Οι προτάσεις που διατηρούνται μετατρέπονται σε ακριβέστερα σενάρια και εξετάζονται με ενεργειακά, φωτομετρικά, μικροκλιματικά και τεχνικά εργαλεία.

Πέμπτο στάδιο: πιλοτική εφαρμογή.

Οι αναστρέψιμες και χαμηλού κινδύνου λύσεις δοκιμάζονται σε περιορισμένη κλίμακα και παρακολουθείται η πραγματική τους απόδοση.

Έκτο στάδιο: οριστική τεχνική μελέτη.

Μόνο μετά την ολοκλήρωση των προηγούμενων σταδίων διαμορφώνεται η τελική λύση, με πλήρη σχέδια, υπολογισμούς, προδιαγραφές, κοστολόγηση και τις απαιτούμενες εγκρίσεις.

Το πλαίσιο αυτό τοποθετεί την παραγωγική ΤΝ σε συγκεκριμένο και περιορισμένο ρόλο. Δεν της αναθέτει την τελική απόφαση, αλλά αξιοποιεί τη δυνατότητά της να οργανώνει πληροφορίες και να διευρύνει τον αρχικό χώρο λύσεων.

7.5.11 Επόμενα βήματα για το Παπαστράτειο Δημοτικό Σχολείο

Για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, η επόμενη φάση θα μπορούσε να ξεκινήσει όχι με την άμεση εφαρμογή κάποιου ολοκληρωμένου σεναρίου, αλλά με ένα πρόγραμμα τεκμηρίωσης της υφιστάμενης κατάστασης.

Το πρόγραμμα αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει:

- απογραφή και λειτουργικό έλεγχο των κουφωμάτων και των μέσων σκίασης,
- καταγραφή των κλιματιστικών, των ανεμιστήρων και των ωρών λειτουργίας τους,
- μη καταστροφικό έλεγχο των οπών και των διαδρομών αερισμού,
- εποχικές μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, CO₂ και φυσικού φωτισμού,

- αποτύπωση των υλικών, των δικτύων και των κινήσεων στον αύλειο χώρο,
- διερεύνηση του θεσμικού καθεστώτος και των επιτρεπόμενων επεμβάσεων,
- έλεγχο της στατικής και κατασκευαστικής δυνατότητας τοποθέτησης νέων στοιχείων.

Με βάση τα δεδομένα αυτά θα μπορούσαν να επιλεγούν μία ή δύο αναστρέψιμες παρεμβάσεις για πιλοτική εφαρμογή. Η αξιολόγησή τους θα επέτρεπε να διαπιστωθεί αν υπάρχει πραγματική ανάγκη μετάβασης σε ένα περισσότερο εκτεταμένο σενάριο. Έτσι, οι προτάσεις του ChatGPT και του Gemini δεν θα αντιμετωπίζονταν ως τελικές επιλογές, αλλά ως βάση για την οργάνωση μιας επόμενης, περισσότερο τεκμηριωμένης φάσης.

8. Εφαρμογές

8.1 Θεωρητικές και πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας παρουσιάζουν θεωρητική και πρακτική σημασία, η οποία υπερβαίνει τη σύγκριση των επιμέρους απαντήσεων του ChatGPT και του Gemini. Παρότι προέρχονται από μία συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης και δεν επιτρέπουν γενικεύσεις για το σύνολο των εφαρμογών παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης, συμβάλλουν στην αποσαφήνιση του ρόλου που μπορούν να αναλάβουν τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα κατά τα πρώιμα στάδια του βιώσιμου αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

Σε θεωρητικό επίπεδο, τα ευρήματα ενισχύουν την προσέγγιση σύμφωνα με την οποία η παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη είναι καταλληλότερη για έναν βοηθητικό ή συνεργατικό ρόλο και όχι για τη λειτουργία ενός αυτόνομου σχεδιαστή. Τα δύο εργαλεία μπόρεσαν να οργανώσουν ετερογενείς πληροφορίες, να εντοπίσουν βασικά πεδία παρέμβασης και να παραγάγουν εναλλακτικές κατευθύνσεις. Δεν μπορούσαν, όμως, να επιβεβαιώσουν την τεχνική απόδοση των λύσεων, να αξιολογήσουν πλήρως τις κατασκευαστικές τους συνέπειες ή να αναλάβουν την ευθύνη της τελικής επιλογής. Η συνεργασία ανθρώπου και ΤΝ προϋποθέτει, επομένως, διακριτούς ρόλους: το μοντέλο μπορεί να υποστηρίξει τη σύνθεση της πληροφορίας και τη διερεύνηση εναλλακτικών, ενώ ο μελετητής διατηρεί την ευθύνη για τον καθορισμό των στόχων, τον έλεγχο των παραδοχών και τη λήψη της απόφασης (Albukhari, 2025; Li et al., 2025).

Μία δεύτερη θεωρητική εφαρμογή αφορά την αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων ΤΝ ως αποτέλεσμα ολόκληρης της ερευνητικής και σχεδιαστικής διαδικασίας. Η ποιότητα των απαντήσεων δεν εξαρτάται μόνο από τις δυνατότητες του μοντέλου, αλλά και από την πληρότητα του πληροφοριακού υλικού, τη σαφήνεια της χωρικής οριοθέτησης, τη διατύπωση των prompts και τα κριτήρια με τα οποία εξετάζονται τα αποτελέσματα. Συνεπώς, η αξιολόγηση μιας εφαρμογής ΤΝ δεν πρέπει να περιορίζεται στον αριθμό ή στην πρωτοτυπία των προτάσεων, αλλά να περιλαμβάνει τη σύνδεσή τους με τα διαθέσιμα δεδομένα, τη διαφάνεια των παραδοχών και την αναγνώριση των πληροφοριών που απουσιάζουν.

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν επίσης την ανάγκη διάκρισης μεταξύ σχεδιαστικής ευλογοφάνειας και αποδεδειγμένης περιβαλλοντικής απόδοσης. Μία πρόταση για

εξωτερική σκίαση, βελτίωση του φυσικού αερισμού ή αντικατάσταση σκληρών επιφανειών μπορεί να είναι σύμφωνη με βασικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού, χωρίς αυτό να αποδεικνύει το μέγεθος του αναμενόμενου οφέλους. Τα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να παράγουν και να οργανώνουν σχεδιαστικές υποθέσεις, αλλά η τεχνική τους επιβεβαίωση απαιτεί μετρήσεις, υπολογισμούς και κατάλληλες προσομοιώσεις. Η παραγωγική ΤΝ και τα εργαλεία σχεδιασμού που βασίζονται στην απόδοση πρέπει, επομένως, να αντιμετωπίζονται ως συμπληρωματικές και όχι ως ανταγωνιστικές τεχνολογίες (Huang et al., 2025; Suphavarophas et al., 2024).

Σε πρακτικό επίπεδο, η έρευνα δείχνει ότι τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να αξιοποιηθούν κυρίως κατά την προμελέτη και την αρχική οργάνωση ενός έργου. Μπορούν να συνθέτουν σχέδια, φωτογραφίες, τεχνικές περιγραφές και παρατηρήσεις σε έναν οργανωμένο κατάλογο προβλημάτων, εναλλακτικών παρεμβάσεων, τεχνικών προϋποθέσεων και ελλειπόντων δεδομένων. Η λειτουργία αυτή μπορεί να διευκολύνει την προετοιμασία ενός αρχικού τεχνικού δελτίου και να δημιουργήσει κοινό υλικό συζήτησης μεταξύ των τεχνικών υπηρεσιών, της διοίκησης του σχολείου και των εμπλεκόμενων επαγγελματιών.

Χρήσιμη πρακτική εφαρμογή αποτελεί επίσης η παραγωγή διαβαθμισμένων σεναρίων παρέμβασης. Η διάκριση μεταξύ ενός ελάχιστου και ενός περισσότερο ολοκληρωμένου σεναρίου επιτρέπει τον διαχωρισμό των άμεσων ενεργειών συντήρησης και ελέγχου από τις παρεμβάσεις που απαιτούν ειδικές μελέτες, εγκρίσεις και μεγαλύτερους πόρους. Με αυτόν τον τρόπο, η ΤΝ μπορεί να υποστηρίξει την αρχική ιεράρχηση των αναγκών, χωρίς να υποκαθιστά την τεχνική αξιολόγηση ή τον οικονομικό και κατασκευαστικό προγραμματισμό.

Η μεθοδολογία της εργασίας μπορεί, ακόμη, να αποτελέσει τη βάση ενός απλού πρωτοκόλλου υπεύθυνης χρήσης της παραγωγικής ΤΝ σε προκαταρκτικές κτιριακές αξιολογήσεις. Το πρωτόκολλο αυτό περιλαμβάνει τη συγκρότηση ελεγχόμενου πληροφοριακού πακέτου, την καταγραφή των prompts και της έκδοσης του συστήματος, τη σαφή διάκριση δεδομένων και υποθέσεων, την παραγωγή περισσότερων επιπέδων παρέμβασης, την αναγνώριση των ελλειπόντων στοιχείων και την ανεξάρτητη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τους αρμόδιους επαγγελματίες. Η εφαρμογή αυτών των βημάτων ενισχύει τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και την ανθρώπινη εποπτεία, στοιχεία που συνδέονται με την αξιόπιστη χρήση της ΤΝ (AI HLEG, 2019).

Για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, τα παραγόμενα σενάρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αφετηρία για την οργάνωση των επόμενων τεχνικών ενεργειών και όχι ως τελικές προτάσεις εφαρμογής. Η αξία τους βρίσκεται κυρίως στον εντοπισμό των σημείων που απαιτούν ακριβέστερη αποτύπωση, μετρήσεις, ειδικές μελέτες και διεπιστημονική αξιολόγηση. Έτσι, η παραγωγική ΤΝ μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη προετοιμασία της διαδικασίας αναβάθμισης, διατηρώντας την τελική κρίση και την επαγγελματική ευθύνη στους αρμόδιους μελετητές.

Βιβλιογραφία

- Adewale, B. A., Ene, V. O., Ogunbayo, B. F., & Aigbavboa, C. O. (2024). A systematic review of the applications of AI in a sustainable building's lifecycle. *Buildings*, 14(7), 2137. <https://doi.org/10.3390/buildings14072137>
- Akyel, I., Komurlu, R., & Arditi, D. (2025). A comparative analysis of green building certification systems for schools. *Sustainability*, 17(23), 10491. <https://doi.org/10.3390/su172310491>
- Al-Dahash, H. F. K., & Mamoori, S. A. A. I. (2021). Advantages of implementing sustainable principles in school building projects. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10(7), 384-389.
- Albukhari, I. N. (2025). The role of artificial intelligence (AI) in architectural design: A systematic review of emerging technologies and applications. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, 16, 1457-1476. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00186-1>
- Antoniadis, D., Katsoulas, N., & Papanastasiou, D. K. (2020). Thermal environment of urban schoolyards: Current and future design with respect to children's thermal comfort. *Atmosphere*, 11(11), 1144. <https://doi.org/10.3390/atmos11111144>
- Becker, C., Lauterbach, G., Spengler, S., Dettweiler, U., & Mess, F. (2017). Effects of regular classes in outdoor education settings: A systematic review on students' learning, social and health dimensions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(5), 485.
- Berges-Alvarez, I., Martínez-Rocamora, A., & Marrero, M. (2024). A systematic review of BIM-based life cycle sustainability assessment for buildings. *Sustainability*, 16(24), 11070. <https://doi.org/10.3390/su162411070>
- Bibri, S. E., & Huang, J. (2025). AI and AI-powered digital twins for smart, green, and zero-energy buildings: A systematic review of leading-edge solutions for advancing environmental sustainability goals. *Environmental Science and Ecotechnology*, 28, 100628. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2025.100628>
- Binabid, J., Alymani, A., & Alammar, A. (2024). Optimizing outdoor thermal comfort for educational buildings: Case study in the city of Riyadh. *Buildings*, 14(11), 3568. <https://doi.org/10.3390/buildings14113568>

- Bommasani, R., Hudson, D. A., Adeli, E., Altman, R., Arora, S., von Arx, S., Bernstein, M. S., Bohg, J., Bosselut, A., Brunskill, E., Brynjolfsson, E., Buch, S., Card, D., Castellon, R., Chatterji, N., Chen, A., Creel, K., Davis, J. Q., Demszky, D., ... Liang, P. (2021). *On the opportunities and risks of foundation models* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07258>
- Collaborative for High Performance Schools. (2021). *CA-CHPS criteria v2.0*.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Debrah, C., Chan, A. P. C., & Darko, A. (2022). Artificial intelligence in green building. *Automation in Construction*, 137, 104192. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104192>
- Department for Education. (2018). *Building Bulletin 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools*.
- de Paula, L. M., Oloufa, A., & Tatari, O. (2026). BIM-based machine learning framework for early-stage building energy performance prediction. *Applied Sciences*, 16(1), 320. <https://doi.org/10.3390/app16010320>
- Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, A., & Tookey, J. (2017). A critical comparison of green building rating systems. *Building and Environment*, 123, 243-260.
- Du, C., Esser, S., Nousias, S., & Borrmann, A. (2026). Text2BIM: Generating building models using a large language model-based multiagent framework. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 40(2), 04025142. <https://doi.org/10.1061/JCCEE5.CPENG-6386>
- Ekanayaka Gunasinghalge, L. U. G., Alazab, A., & Talukder, M. A. (2025). Artificial intelligence for energy optimization in smart buildings: A systematic review and meta-analysis. *Energy Informatics*, 8, Article 135. <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00592-8>
- Erfani, A., & Khanjar, H. (2025). Large language models for construction risk classification: A comparative study. *Buildings*, 15(18), 3379. <https://doi.org/10.3390/buildings15183379>
- Ferreira, A., Pinheiro, M. D., de Brito, J., & Mateus, R. (2023). A critical analysis of LEED, BREEAM and DGNB as sustainability assessment methods for retail buildings. *Journal of Building Engineering*, 66, 105825.

- Genkin, M., & McArthur, J. J. (2023). B-SMART: A reference architecture for artificially intelligent autonomic smart buildings. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 106063. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106063>
- Herrington, S., & Lesmeister, C. (2006). The design of landscapes at child-care centres: Seven Cs. *Landscape Research*, 31(1), 63-82.
- Γκριζης, Δ. (2015). *Τα σχολεία του Μεσοπολέμου στο Αγρίνιο* [Ερευνητική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων].
- Huang, L., Yu, W., Ma, W., Zhong, W., Feng, Z., Wang, H., Chen, Q., Peng, W., Feng, X., Qin, B., & Liu, T. (2023). *A survey on hallucination in large language models: Principles, taxonomy, challenges, and open questions* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.05232>
- Huang, Y., Zhang, Z., Su, P., Li, T., Zhang, Y., He, X., & Li, H. (2025). Performance-driven generative design in buildings: A systematic review. *Buildings*, 15(24), 4556. <https://doi.org/10.3390/buildings15244556>
- Iversen, O., & Huang, L. (2026). Leveraging large language models for BIM-based automated compliance checking. *Automation in Construction*, 182, 106707. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106707>
- Jia, L., Chen, M., Chen, C., & Jin, Y. (2025). A semantic web and IFC-based framework for automated BIM compliance checking. *Buildings*, 15(15), 2633. <https://doi.org/10.3390/buildings15152633>
- Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255-260. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>
- Kapoor, N. R., Kumar, A., Alam, T., Kumar, A., Kulkarni, K. S., & Blechich, P. (2021). A review on indoor environment quality of Indian school classrooms. *Sustainability*, 13(21), 11855.
- Khan, A., Chang, S., & Chang, H. (2025). Generative AI approaches for architectural design automation. *Automation in Construction*, 180, 106506. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106506>
- Kutá, D., & Faltejsek, M. (2025). The role of artificial intelligence in the transformation of the BIM environment: Current state and future trends. *Applied Sciences*, 15(18), 9956. <https://doi.org/10.3390/app15189956>
- Kuo, M., Barnes, M., & Jordan, C. (2019). Do experiences with nature promote learning? Converging evidence of a cause-and-effect relationship. *Frontiers in Psychology*, 10, 305.

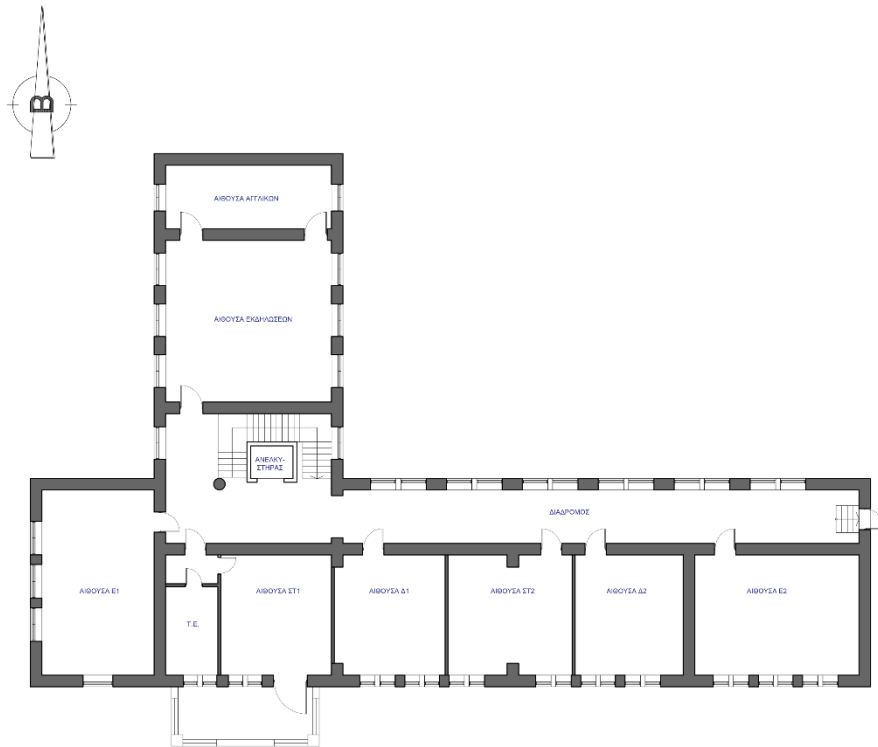
- Lanza, K., Alcazar, M., Durand, C. P., Salvo, D., Villa, U., & Kohl, H. W., III. (2021). Effects of trees, gardens, and nature trails on heat index and child health: Design and methods of the Green Schoolyards Project. *BMC Public Health*, 21, Article 91. <https://doi.org/10.1186/s12889-020-10094-0>
- Lanza, K., Alcazar, M., Durand, C. P., Salvo, D., Villa, U., & Kohl, H. W., III. (2023). Heat-resilient schoolyards: Relations between temperature, shade, and physical activity of children during recess. *Journal of Physical Activity and Health*, 20(2), 134-141.
- Lanzaro, B., & Ucci, M. (2024). Teacher and parent perception of biophilic conditions in primary-school environments and their impact on children's wellbeing. *Architecture*, 4(2), 367-389. <https://doi.org/10.3390/architecture4020021>
- Le, A., Park, K. S., Domingo, N., Rasheed, E., & Mithraratne, N. (2021). Sustainable refurbishment for school buildings: A literature review. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 39(1), 5-19. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-01-2018-0009>
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521, 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Mann, J., Gray, T., Truong, S., Brymer, E., Passy, R., Ho, S., Sahlberg, P., Ward, K., Bentsen, P., Curry, C., & Cowper, R. (2022). Getting out of the classroom and into nature: A systematic review of nature-specific outdoor learning on school children's learning and development. *Frontiers in Public Health*, 10, 877058.
- Martin, H., James, J., & Chadee, A. (2025). Exploring large language model AI tools in construction project risk assessment: ChatGPT limitations in risk identification, mitigation strategies, and user experience. *Journal of Construction Engineering and Management*, 151(9), 04025119. <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-16658>
- Mendell, M. J., & Heath, G. A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, 15(1), 27-52. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>
- Ministry of Education. (2022). *Designing quality learning spaces: Indoor air quality and thermal comfort* (Version 2.0). New Zealand Government.
- National Research Council. (2007). *Green schools: Attributes for health and learning*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11756>
- Pachta, V., & Giourou, V. (2022). Comparative life cycle assessment of a historic and a modern school building, located in the city of Naoussa, Greece. *Sustainability*, 14(7), 4216.

- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 122, 103517. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- Ramli, N. H., Zain, A. M., & Jusoff, K. (2012). A comparative study of green school guidelines. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 38, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.341>
- Saka, A., Taiwo, R., Saka, N., Salami, B. A., Ajayi, S., Akande, K., & Kazemi, H. (2024). GPT models in construction industry: Opportunities, limitations, and a use case validation. *Developments in the Built Environment*, 17, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100300>
- Salameh, M. (2024). Modifying school courtyard design to optimize thermal conditions and energy consumption in a hot arid climate. *Journal of Architectural Engineering*, 30(4), Article 04024033. <https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1813>
- Saraiva, T. S., de Almeida, M., & Bragança, L. (2019). Adaptation of the SBTool for sustainability assessment of high school buildings in Portugal-SAHSB^PT. *Applied Sciences*, 9(13), 2664.
- Saraiva, T. S., de Almeida, M., Bragança, L., & Barbosa, M. T. (2018). Environmental comfort indicators for school buildings in sustainability assessment tools. *Sustainability*, 10(6), 1849.
- Suphavarophas, P., Wongmahasiri, R., Keonil, N., & Bunyarittikit, S. (2024). A systematic review of applications of generative design methods for energy efficiency in buildings. *Buildings*, 14(5), 1311. <https://doi.org/10.3390/buildings14051311>
- Taşçı, B. G. (2015). “Sustainability” education by sustainable school design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 186, 868-873. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.04.199>
- Tian, C., Ahmad, N. A., Abd Rased, A. N. N. W., Li, H., Li, W., & Abdalla, A. N. (2025). Parametric multi-objective optimization of rural building envelopes using NSGA-II and Honeybee-EnergyPlus simulation framework. *Case Studies in Thermal Engineering*, 76, 107297. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107297>
- Tonmoy, S. M. T. I., Zaman, S. M. M., Jain, V., Rani, A., Rawte, V., Chadha, A., & Das, A. (2024). A comprehensive survey of hallucination mitigation techniques in large language models [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.01313>

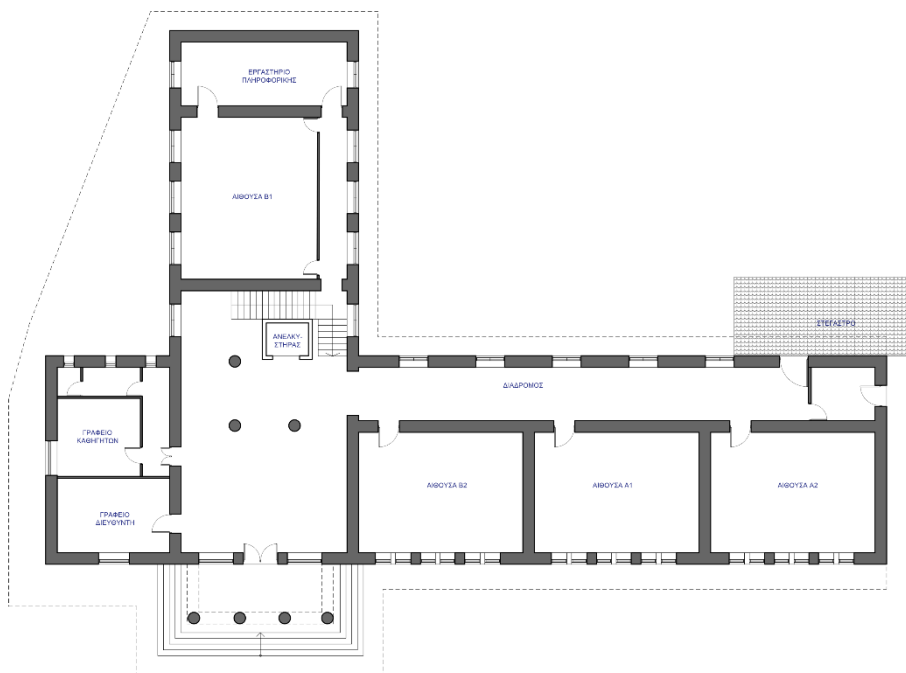
- Toyinbo, O. (2023). Indoor environmental quality, pupils' health, and academic performance-A literature review. *Buildings*, 13(9), 2172. <https://doi.org/10.3390/buildings13092172>
- Tsikakos, P., Chassiakos, A., Papadimitropoulos, V., & Papamanolis, A. (2025). BIM-based machine learning application for parametric assessment of building energy performance. *Energies*, 18(1), 201. <https://doi.org/10.3390/en18010201>
- Tsirogiannis, P., Theodoridou, I., & Tsitoura, M. (2015). Application of microclimatic landscape design in schoolyards in Greece. *Acta Horticulturae*, 1092, 335-343. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1092.44>
- UNICEF. (2021a). *Good practice guide on building an inclusive playground*. UNICEF Serbia.
- UNICEF. (2021b). *Policy guidance on AI for children 2.0: Recommendations for building AI policies and systems that uphold child rights*. UNICEF Office of Global Insight and Policy.
- van den Bogerd, N., Hovinga, D., Hiemstra, J. A., & Maas, J. (2023). The potential of green schoolyards for healthy child development: A conceptual framework. *Forests*, 14(4), 660. <https://doi.org/10.3390/f14040660>
- Walshe, R., Evans, N. S., & Law, L. (2024). School gardens and student engagement: A systematic review exploring benefits, barriers and strategies. *Issues in Educational Research*, 34(2), 782-801.
- Webb, A. L. (2017). Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 748-759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>
- Zhao, W. X., Zhou, K., Li, J., Tang, T., Wang, X., Hou, Y., Min, Y., Zhang, B., Zhang, J., Dong, Z., Du, Y., Yang, C., Chen, Y., Chen, Z., Jiang, J., Ren, R., Li, Y., Tang, X., Liu, Z., ... Wen, J.-R. (2023). *A survey of large language models* [Preprint]. arXiv.

Παράρτημα

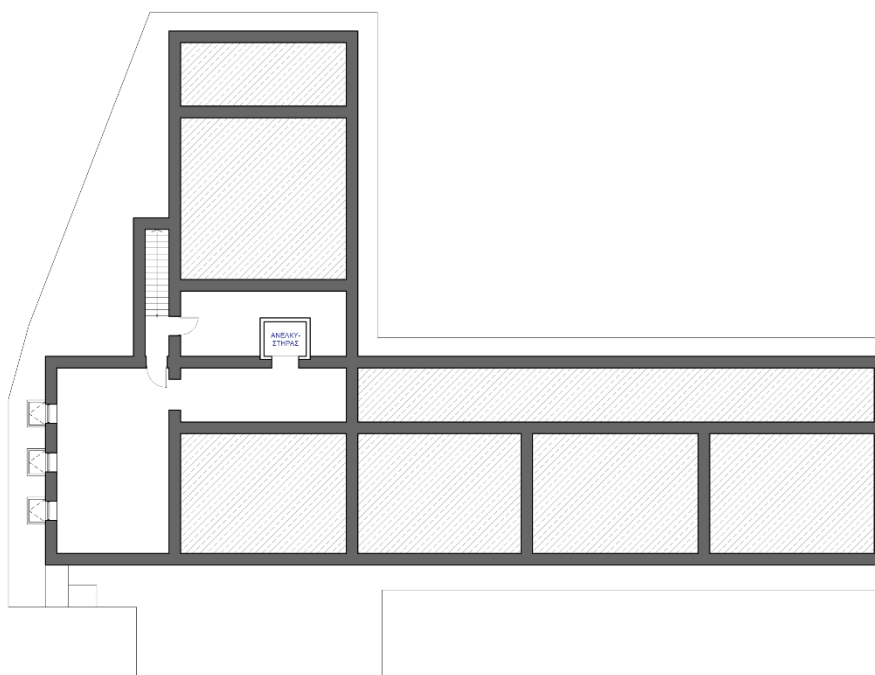
ΕΙΚΟΝΕΣ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΑ



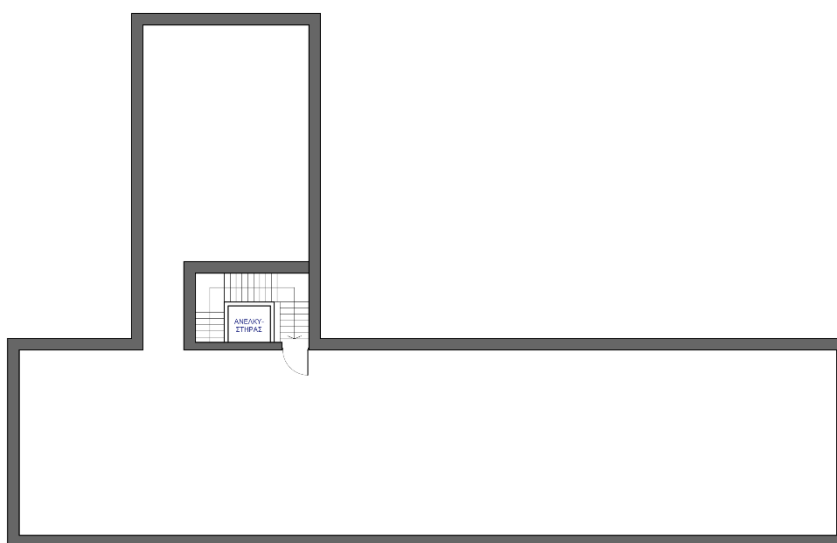
Εικόνα 1: Κάτοψη πρώτου ορόφου, Αποτύπωση και σχεδίαση από τον συγγραφέα



Εικόνα 2: Κάτοψη ισόγειου, Αποτύπωση και σχεδίαση από τον συγγραφέα



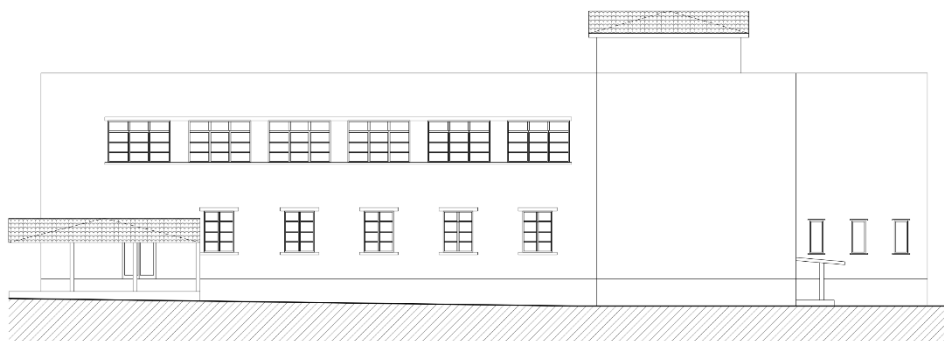
Εικόνα 3: Κάτοψη υπογείου, Αποτύπωση και σχεδίαση από τον συγγραφέα



Εικόνα 4: Κάτοψη δώματος, Αποτύπωση και σχεδίαση από τον συγγραφέα



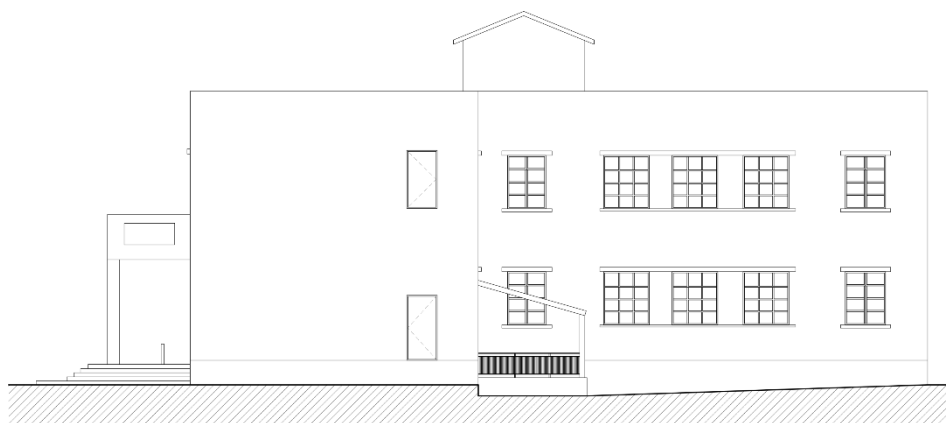
Εικόνα 5: Νότια Όψη, Αποτύπωση και σχεδίαση από τον συγγραφέα



Εικόνα 6: Βορεινή Όψη, Αποτύπωση και σχεδίαση από τον συγγραφέα



Εικόνα 7: Δυτική Όψη, Αποτύπωση και σχεδίαση από τον συγγραφέα



Εικόνα 8: Ανατολική Όψη, Αποτύπωση και σχεδίαση από τον συγγραφέα

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΤΙΡΙΟΥ



Εικόνα 9: Απεικόνιση κουφώματος (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 10: Νότια όψη σχολείου (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 11: Νότια όψη σχολείου και περιβάλλοντος χώρος (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 12: Νότια όψη σχολείου και περιβάλλοντος χώρος (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



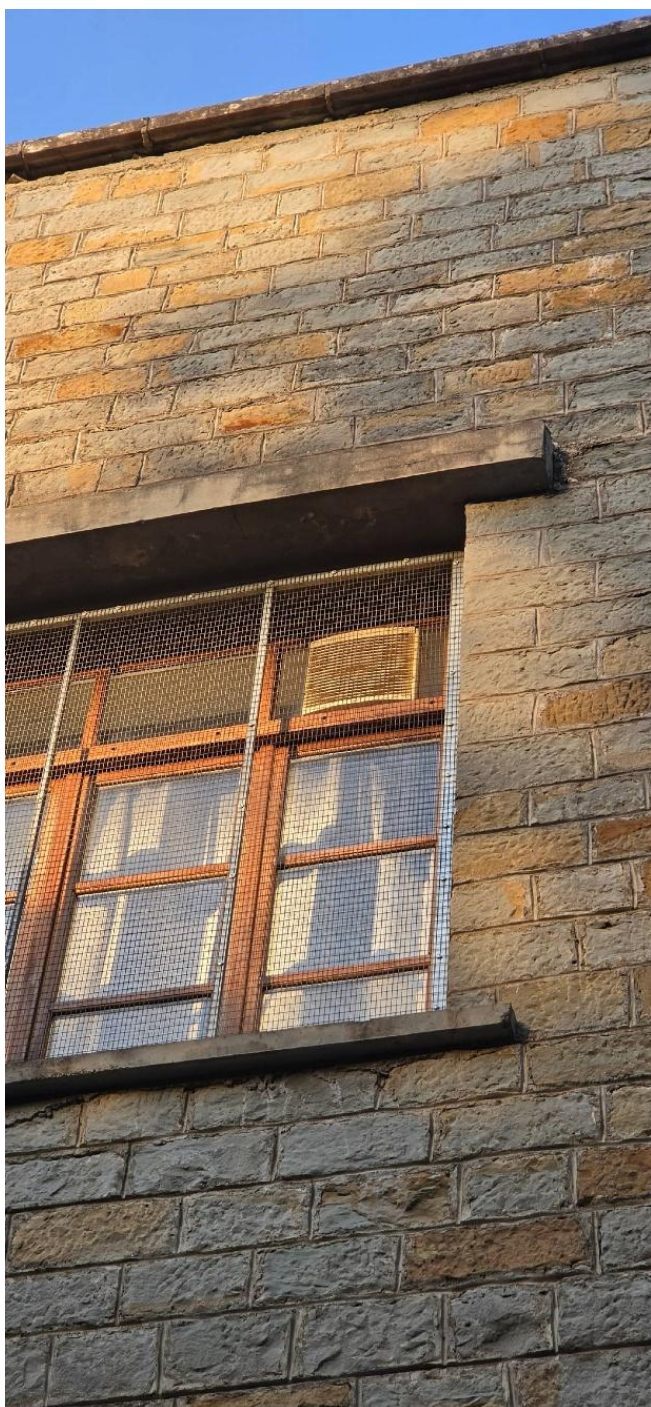
Εικόνα 13: Νότια όψη σχολείου (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 14: Ανατολική πλευρά σχολείου και απεικόνιση κλιματισμού (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 15: Περιβάλλοντας χώρος (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 16: Απεικόνιση αερισμού αιθουσών (Πηγή: προσωπικό αρχείο)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.