



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Διαχείρισης Τεχνικών Έργων (ΔΧΤ)

Διπλωματική Εργασία

Συγκριτική Αξιολόγηση Βιοκλιματικής και Συμβατικής Κατοικίας
στην Ελλάδα με χρήση Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής
(Dynamic LCA) και Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής
(LCSA)

Ελένη Μαγγανά

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μαρία Μπακατσάκη

Πάτρα, Ιούνιος 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.

«Συγκριτική Αξιολόγηση Βιοκλιματικής και Συμβατικής Κατοικίας
στην Ελλάδα με χρήση Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής
(Dynamic LCA) και Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής
(LCSA)»

«Ελένη Μαγγανά»

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Μαρία Μπακατσάκη

Δρ. Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης

Μέλος ΣΕΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Τσαγκαράκης

Καθηγητής

Μέλος ΣΕΠ

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη συμβολή και την υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους οφείλω να ευχαριστήσω θερμά.

Πρώτα και κύρια, εκφράζω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα. Μαρία Μπακατσάκη, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες επιστημονικές παρατηρήσεις και την αμέριστη υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον συν-επιβλέποντα καθηγητή, κ. Κωνσταντίνο Τσαγκαράκη, για την συμβολή του στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στην οικογένειά μου, της οποίας η αγάπη, η υπομονή και η αμέριστη συμπαράσταση αποτέλεσαν την ισχυρότερη κινητήρια δύναμη σε κάθε βήμα αυτής της προσπάθειας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη βιωσιμότητα κτηριακών κατασκευών μέσω της εφαρμογής της Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Assessment – DLCA) και της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA). Σκοπός της μελέτης είναι η συγκριτική αξιολόγηση μιας συμβατικής και μιας βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα, με στόχο τη διερεύνηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων των δύο προσεγγίσεων σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών.

Για την επίτευξη του στόχου, αναπτύσσεται υπολογιστικό μοντέλο βασισμένο σε παραδοχές σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος ενέργειας, το κόστος κατασκευής και τους συντελεστές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η δυναμική διάσταση της ανάλυσης ενσωματώνεται μέσω της χρονικής εξέλιξης του συντελεστή εκπομπών του ελληνικού ενεργειακού μίγματος, λαμβάνοντας υπόψη τη σταδιακή αποανθρακοποίηση του τομέα ηλεκτροπαραγωγής. Υπολογίζονται οι λειτουργικές εκπομπές CO₂, το κόστος κύκλου ζωής (Life Cycle Cost – LCC) και δείκτες βιωσιμότητας που συνθέτουν το πλαίσιο της LCSA.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μειωμένες εκπομπές CO₂ κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της (εξοικονόμηση 83.820 kg CO₂, μείωση ενέργειας 39,3%), λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης και της αξιοποίησης βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού. Η ονομαστική ανάλυση LCC αναδεικνύει οικονομικό όφελος 45.000 € υπέρ της βιοκλιματικής, ενώ η ανάλυση σε Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV, 5%) αναδεικνύει εξάρτηση του αποτελέσματος από τις παραδοχές. Η εκτεταμένη αξιολόγηση κοινωνικών δεικτών S-LCA (7 δείκτες, κλίμακα 1–5) αναδεικνύει υπεροχή της βιοκλιματικής κατοικίας με μέσο σκορ 4,4 έναντι 2,1. Η ανάλυση ευαισθησίας, η οποία πραγματοποιήθηκε ως προς την τιμή της ενέργειας, το επιτόκιο προεξόφλησης και το σενάριο αποανθρακοποίησης του ενεργειακού μίγματος, επιβεβαιώνει την ευστάθεια των περιβαλλοντικών συμπερασμάτων σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Τα ευρήματα αναδεικνύουν τη σημασία της ενσωμάτωσης δυναμικών παραμέτρων στις περιβαλλοντικές αξιολογήσεις και επιβεβαιώνουν τον καθοριστικό ρόλο του βιοκλιματικού σχεδιασμού στη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο κτηριακό απόθεμα στην Ελλάδα.

Λέξεις – Κλειδιά

DLCA, LCA, LCSA, Βιοκλιματική κατοικία, Συμβατική κατοικία, Κύκλος ζωής, Εκπομπές CO₂, Βιωσιμότητα, Κόστος κύκλου ζωής.

Comparative Evaluation of Bioclimatic and Conventional Residential Buildings in Greece using Dynamic Life Cycle Assessment (Dynamic LCA) and Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)

Eleni Maggana

Abstract

This thesis investigates the sustainability of residential buildings through the application of Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA) and Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). The aim of the study is to compare a conventional residential building and a bioclimatic residential building in Greece, assessing their environmental, economic and social performance over a 50-year life cycle.

To achieve this objective, a computational model is developed based on assumptions regarding energy consumption, construction costs, energy prices and carbon emission factors. The dynamic aspect of the assessment is incorporated through the temporal evolution of the carbon intensity of the Greek electricity grid, taking into account the gradual decarbonization of the power generation sector. Operational CO₂ emissions, Life Cycle Cost (LCC) and sustainability indicators forming the LCSA framework are calculated and evaluated.

The results indicate that the bioclimatic residential building achieves significantly lower environmental impacts and reduced life-cycle CO₂ emissions (savings of 83,820 kg CO₂; energy reduction of 39.3%) due to its improved energy efficiency and the implementation of passive and active bioclimatic design strategies. The nominal LCC analysis shows a cost advantage of 45,000 € in favour of the bioclimatic building, while the Net Present Value (NPV) analysis at 5% discount rate reveals that the economic outcome is sensitive to assumptions. An extended social S-LCA assessment using seven indicators (scale 1–5) yields a mean social score of 4.4 versus 2.1 for the conventional building. A sensitivity analysis across three parameters (energy price, discount rate, decarbonisation scenario)

confirms the robustness of the environmental conclusions across all scenarios. The findings highlight the importance of incorporating dynamic parameters into environmental assessments and confirm the critical role of bioclimatic design in promoting a more sustainable building stock in Greece.

Keywords

DLCA, LCA, LCSA, Bioclimatic residential building, Conventional residential building, Life cycle, CO₂ emissions, Sustainability, Life cycle cost.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xiii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Σκοπός της εργασίας	4
1.3 Στόχοι της εργασίας	5
1.4 Ερευνητικά ερωτήματα	5
1.5 Πρωτοτυπία της εργασίας	6
1.6 Δομή της εργασίας	7
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1 Συμβατικές κατοικίες	9
2.2 Βιοκλιματικές κατοικίες.....	10
2.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA).....	12
2.4 Περιορισμοί της στατικής LCA	14
2.5 Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα	15
2.5.1 Βασικές αρχές Dynamic LCA.....	15
2.5.2 Dynamic LCI.....	17
2.5.3 Dynamic LCIA.....	18
2.5.4 Dynamic vs Static LCA	20
2.5.5 Dynamic electricity grid mix	21
2.6 Εφαρμογές της Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα	22
2.6.1 Κατοικίες.....	22
2.6.2 Λειτουργική κατανάλωση ενέργειας.....	23
2.6.3 Ενεργειακές αναβαθμίσεις και ανακαινίσεις	24
2.6.4 Κλιματική αλλαγή.....	25
2.7 BIM, Τεχνητή Νοημοσύνη και Ψηφιακό Δίδυμο στη Dynamic LCA	26
2.8 Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC).....	28
2.9 Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA).....	29
2.9.1 Περιβαλλοντικοί δείκτες.....	32
2.9.2 Οικονομικοί δείκτες	33
2.9.3 Κοινωνικοί δείκτες.....	34
2.10 Ερευνητικά κενά και μελλοντικές κατευθύνσεις	35
2.11 Συνοπτική παρουσίαση βιβλιογραφίας	36
3. Μεθοδολογία.....	41
3.1 Εισαγωγή.....	41
3.2 Περιγραφή των κατοικιών μελέτης.....	42
3.2.1 Συμβατική κατοικία	43
3.2.2 Βιοκλιματική κατοικία.....	44
3.3 Λειτουργική μονάδα και χρονικός ορίζοντας	46
3.4 Όρια συστήματος	47
3.5 Μεθοδολογία Dynamic LCA	48
3.5.1 Δυναμική Απογραφή Κύκλου Ζωής (Dynamic LCI).....	50

3.5.2	Δυναμική Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Dynamic LCIA)	51
3.5.3	Δυναμική εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής	52
3.6	Μεθοδολογία Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC)	54
3.7	Μεθοδολογία Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA)	55
3.8	Συλλογή δεδομένων και παραδοχές	57
3.8.1	Δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας	59
3.8.2	Δομικά υλικά	61
3.8.3	Συντελεστές εκπομπών	63
3.8.4	Οικονομικά δεδομένα	64
3.9	Εργαλεία και λογισμικά ανάλυσης	66
3.10	Ανάλυση Ευαισθησίας	67
3.11	Περιορισμοί της έρευνας	68
4.	Αποτελέσματα και συγκριτική αξιολόγηση	71
4.1	Υπολογισμός λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας	71
4.2	Υπολογισμός εκπομπών CO ₂ μέσω Dynamic LCA	73
4.2.1	Σύγκριση Static LCA και Dynamic LCA	77
4.3	Υπολογισμός κόστους κύκλου ζωής (LCC)	78
4.4	Συγκριτική αξιολόγηση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας	81
4.5	Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης	84
4.6	Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης	85
4.7	Εφαρμογή της μεθοδολογίας LCSA και συνολική αξιολόγηση βιωσιμότητας ..	87
4.8	Συζήτηση αποτελεσμάτων	90
4.9	Αποτελέσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας	92
5.	Συμπεράσματα και προτάσεις	94
5.1	Συμπεράσματα	94
5.2	Περιορισμοί της έρευνας	96
5.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	97
	Βιβλιογραφία	99
	Παράρτημα Α: Αναλυτικοί υπολογισμοί	102
A.1	Υπολογισμός λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας	102
A.2	Υπολογισμός συνολικής κατανάλωσης ενέργειας 50 ετών	102
A.3	Υπολογισμός Dynamic LCA	103
A.4	Υπολογισμός εκπομπών CO ₂ ανά δεκαετία	103
A.5	Υπολογισμός κόστους κύκλου ζωής (LCC)	104
A.6	Υπολογισμός NPV Κόστους Κύκλου Ζωής (discount rate 5%)	104
	Παράρτημα Β: Δεδομένα και Παραδοχές της Μελέτης	106

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1	Κλιματικές ζώνες της Ελλάδας βάσει KENAK.....	3
Εικόνα 2	Γραφικά σχήματα βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού.	4
Εικόνα 3	Παθητικά ηλιακά συστήματα σε βιοκλιματική κατοικία.	10
Εικόνα 4	Βασικές αρχές παθητικού ηλιακού σχεδιασμού σε βιοκλιματική κατοικία.	12
Σχήμα 1	Βασικά στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)	13
Σχήμα 2	Σύγκριση της συμβατικής (Static LCA) και της δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (DLCA).	16
Σχήμα 3	Δομή της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA).....	30
Σχήμα 4	Πλαίσιο ορίων συστήματος της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA).	30
Σχήμα 5	Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας αξιολόγησης.....	70
Σχήμα 6	Σύγκριση συνολικής λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών	73
Σχήμα 7	Σύγκριση συνολικών λειτουργικών εκπομπών CO ₂ συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας	76
Σχήμα 8	Σύγκριση συνολικού κόστους κύκλου ζωής (LCC) των δύο σεναρίων κατοικίας	81
Σχήμα 9	Συγκριτική αξιολόγηση βιωσιμότητας συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας (Radar Diagram).....	83
Σχήμα 10	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας — Διαφορά NPV.....	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1	Σύνοψη βασικών ερευνητικών μελετών	37
Πίνακας 2	Βασικές διαφορές μεταξύ static LCA και Dynamic LCA	38
Πίνακας 3	Βασικές διαστάσεις της LCSA στον κτιριακό τομέα	39
Πίνακας 4	Βασικά ερευνητικά κενά της διεθνούς βιβλιογραφίας	39
Πίνακας 5	Σύγκριση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας	45
Πίνακας 6	Βασικές παραδοχές μοντέλου ανάλυσης	58
Πίνακας 7	Δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης κατοικιών	60
Πίνακας 8	Τεχνικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενων κατοικιών	62
Πίνακας 9	Βασικοί συντελεστές εκπομπών και παραδοχές	64
Πίνακας 10	Βασικά οικονομικά δεδομένα και παραδοχές	66
Πίνακας 11	Υπολογισμός ετήσιας λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας	71
Πίνακας 12	Συνολική λειτουργική κατανάλωση ενέργειας σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών	72
Πίνακας 13	Χρονική εξέλιξη συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας	74
Πίνακας 14	Ετήσιες εκπομπές CO ₂ ανά χρονική περίοδο	74
Πίνακας 15	Εκπομπές CO ₂ ανά δεκαετία	75
Πίνακας 16	Σύγκριση Static LCA vs Dynamic LCA	77
Πίνακας 17	Αρχικό κόστος κατασκευής	78
Πίνακας 18	Ετήσιο λειτουργικό ενεργειακό κόστος	79
Πίνακας 19	Συνολικό ενεργειακό κόστος σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών	79
Πίνακας 20	Συνολικό κόστος κύκλου ζωής (LCC)	80
Πίνακας 21	Κόστος Κύκλου Ζωής σε Καθαρή Παρούσα Αξία — NPV (discount rate 5%, 50 έτη)	80
Πίνακας 22	Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων	82
Πίνακας 23	Συνοπτικά αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης	84
Πίνακας 24	Συνοπτικά αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης	86
Πίνακας 25	Σύνθεση αποτελεσμάτων εφαρμογής LCSA	88
Πίνακας 26	Εκτεταμένη αξιολόγηση κοινωνικών δεικτών βάσει S-LCA (κλίμακα 1–5)	89
Πίνακας 27	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας	92
Πίνακας 28	Υπολογισμός ετήσιας λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας	102
Πίνακας 29	Συνολική κατανάλωση ενέργειας σε 50 έτη	102
Πίνακας 30	Συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας	103
Πίνακας 31	Εκπομπές CO ₂ ανά δεκαετία	103
Πίνακας 32	Συνολικό κόστος κύκλου ζωής	104
Πίνακας 33	Βασικές παραδοχές της μελέτης	106
Πίνακας 34	Συντελεστές εκπομπών Dynamic LCA	106
Πίνακας 35	Βιβλιογραφική προέλευση δεδομένων	107

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

LCA	Life Cycle Assessment
DLCA	Dynamic Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
GWP	Global Warming Potential
CO ₂	Διοξείδιο του Άνθρακα
ISO	International Organization for Standardization
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
KENAK	Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους καταναλωτές ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, ευθυνόμενος για σημαντικό ποσοστό των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με διεθνείς οργανισμούς, τα κτίρια συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, γεγονός που καθιστά επιτακτική την ανάγκη για ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων στον τομέα των κατασκευών (International Energy Agency, 2022).

Ιδιαίτερα στην ελληνική πραγματικότητα, το υφιστάμενο κτιριακό απόθεμα περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό κατοικιών που κατασκευάστηκαν πριν από την εφαρμογή αυστηρότερων απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία τη διερεύνηση λύσεων που μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση και τις εκπομπές, διατηρώντας παράλληλα αποδεκτό οικονομικό κόστος σε βάθος χρόνου (European Commission, 2018; Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2020).

Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (Energy Performance of Buildings Directive – EPBD), προωθεί τη μετάβαση προς ενεργειακά αποδοτικότερα και περιβαλλοντικά βιώσιμα κτίρια, ενισχύοντας την ανάγκη εφαρμογής σύγχρονων μεθόδων αξιολόγησης στον κτιριακό τομέα (European Parliament and Council, 2018).

Η αυξανόμενη περιβαλλοντική επιβάρυνση, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εργαλείων αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων. Ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), η οποία επιτρέπει την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός κτιρίου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως την κατεδάφιση και τη διαχείριση αποβλήτων (Asdrubali, Fronzetti Colladon, Segneri, & Gandola, 2024).

Ωστόσο, η παραδοσιακή προσέγγιση της LCA χαρακτηρίζεται ως στατική, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τις χρονικές μεταβολές που επηρεάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια ζωής ενός κτιρίου. Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται

η δυναμική προσέγγιση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA), η οποία ενσωματώνει τη χρονική εξέλιξη παραμέτρων όπως το ενεργειακό μείγμα και οι εκπομπές, προσφέροντας πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα (Slavkovic & Stephan, 2025).

Η δυναμική αυτή προσέγγιση αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο σύγχρονο ενεργειακό περιβάλλον, όπου παράγοντες όπως η σταδιακή αποανθρακοποίηση του ενεργειακού μίγματος και η χρονική μεταβολή της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων επηρεάζουν ουσιαστικά τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης.

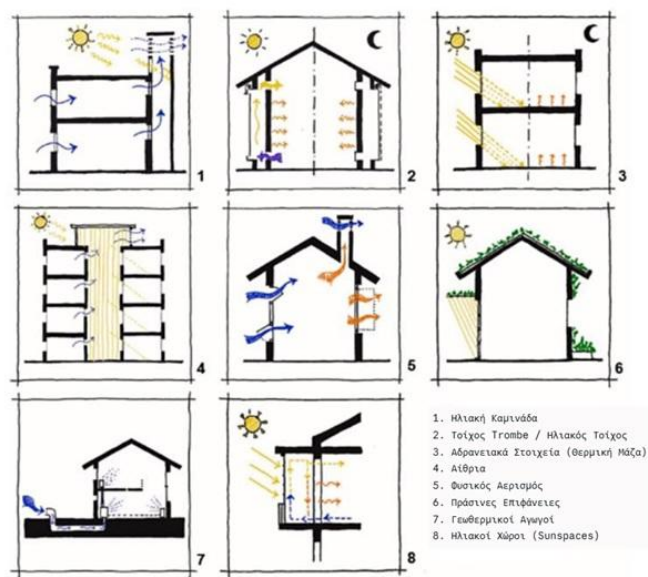
Παράλληλα, η έννοια της βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα δεν περιορίζεται μόνο στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά επεκτείνεται και σε οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε η Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA), η οποία συνδυάζει την περιβαλλοντική αξιολόγηση (LCA), την οικονομική ανάλυση (LCC) και την κοινωνική διάσταση (Social LCA), παρέχοντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση αξιολόγησης (Klöppfer, 2008; United Nations Environment Programme, 2011).

Οι ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας, και ειδικότερα των περιοχών της Μεσογείου με υψηλά θερμικά φορτία κατά τη θερινή περίοδο, καθιστούν ιδιαίτερα σημαντική την εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού στις κατοικίες, με στόχο τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη. Σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK), η Ελλάδα διαιρείται σε τέσσερις κλιματικές ζώνες (Α–Δ), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1α, με τη Ζώνη Α (νότιες περιοχές, νησιά) να παρουσιάζει τα υψηλότερα ψυκτικά φορτία και τη Ζώνη Δ (βορειοδυτικές ορεινές περιοχές) τα υψηλότερα θερμαντικά φορτία.



Εικόνα 1 Κλιματικές ζώνες της Ελλάδας βάσει ΚΕΝΑΚ.
Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας — ΚΕΝΑΚ (<https://bpes.ypeka.gr>).

Στην Ελλάδα, η ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικά και βιώσιμα κτίρια έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη βιοκλιματικών κατοικιών, οι οποίες αξιοποιούν φυσικές διεργασίες και τεχνολογίες για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η σύγκριση μεταξύ συμβατικών και βιοκλιματικών κατοικιών αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών σχεδιαστικών προσεγγίσεων (Olgyay, 1963; Givoni, 1994; Santamouris, 2016). Το Σχήμα 1β παρουσιάζει συνοπτικά τις κύριες βιοκλιματικές στρατηγικές που εφαρμόζονται σε κατοικίες.



Εικόνα 2 Γραφικά σχήματα βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού.
Πηγή: Filippova et al. (2025), *Energies*, 18(19):5230, CC BY 4.0.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση μιας συμβατικής και μιας βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα, με στόχο τη διερεύνηση των διαφορών τους ως προς τη συνολική βιωσιμότητα. Η αξιολόγηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής της Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Assessment – Dynamic LCA) και Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA), προκειμένου να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις των δύο τύπων κατοικιών (Slavkovic & Stephan, 2025; Klöpffer, 2008).

Ειδικότερα, η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τον ρόλο της χρονικής διάστασης στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μέσω της ενσωμάτωσης μεταβαλλόμενων παραμέτρων όπως το ενεργειακό μείγμα και οι εκπομπές κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Παράλληλα, επιδιώκεται η ολοκληρωμένη αξιολόγηση της βιωσιμότητας, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αλλά και το κόστος κύκλου ζωής καθώς και κοινωνικές παραμέτρους που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη χρήση των κατοικιών (Fuller & Petersen, 1996; United Nation Environment Programme, 2011).

Τελικός σκοπός της εργασίας είναι η εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα των εξεταζόμενων κατοικιών στο ελληνικό πλαίσιο, καθώς και η συμβολή στη διαμόρφωση πιο αποτελεσματικών στρατηγικών σχεδιασμού και κατασκευής βιώσιμων κτιρίων (European Parliament and Council, 2018; Santamouris, 2016).

1.3 Στόχοι της εργασίας

Οι επιμέρους στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι ακόλουθοι:

Η κατανόηση των βασικών αρχών της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) και η διερεύνηση της εφαρμογής της στον κτιριακό τομέα (Finnveden, et al., 2009).

Η ανάλυση της δυναμικής προσέγγισης της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA) και η αξιολόγηση της συμβολής της στην ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων (Slavkovic & Stephan, 2025).

Η εκτίμηση του κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Cost – LCC) των εξεταζόμενων κατοικιών, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης (Fuller & Petersen, 1996; International Organization for Standardization, 2017).

Η εφαρμογή της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA), με σκοπό την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης (Klöpffer, 2008; United Nations Environment Programme, 2011).

Η συγκριτική αξιολόγηση μιας συμβατικής και μιας βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα, ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το κόστος και τις κοινωνικές επιδράσεις.

Η διερεύνηση της επίδρασης της χρονικής εξέλιξης παραμέτρων, όπως το ενεργειακό μείγμα, στα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα των δύο προσεγγίσεων και η διατύπωση προτάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων κατοικιών στο ελληνικό πλαίσιο.

1.4 Ερευνητικά ερωτήματα

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

Ποιες είναι οι βασικές διαφορές μεταξύ συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους;

Πώς επηρεάζει η εφαρμογή της δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA) τα αποτελέσματα σε σύγκριση με τη στατική προσέγγιση (Slavkovic & Stephan, 2025);

Ποιο είναι το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των εξεταζόμενων κατοικιών και πώς διαφοροποιείται μεταξύ των δύο τύπων κατασκευής (Fuller & Petersen, 1996; International Organization for Standardization, 2017);

Πώς επηρεάζει η ενσωμάτωση κοινωνικών παραμέτρων μέσω της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA) τη συνολική αξιολόγηση των κατοικιών (Klöppfer, 2008; United Nations Environment Programme, 2011);

Ποια κατασκευή παρουσιάζει μεγαλύτερη συνολική βιωσιμότητα στο ελληνικό πλαίσιο, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια;

1.5 Πρωτοτυπία της εργασίας

Η πρωτοτυπία της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγκειται στην εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης και δυναμικής προσέγγισης αξιολόγησης της βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα. Συγκεκριμένα, η εργασία συνδυάζει τη δυναμική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Assessment – DLCA) με την Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA), ενσωματώνοντας τόσο τη χρονική διάσταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και τις οικονομικές και κοινωνικές παραμέτρους (Slavkovic & Stephan, 2025; Klöppfer, 2008).

Σε αντίθεση με την πλειονότητα των υφιστάμενων μελετών, οι οποίες βασίζονται σε στατικές προσεγγίσεις της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, η παρούσα εργασία λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξέλιξη κρίσιμων παραμέτρων, όπως το ενεργειακό μείγμα και οι εκπομπές, οι οποίες μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια ζωής ενός κτιρίου. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εξαγωγή πιο ρεαλιστικών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους (Finnveden et al., 2009; Slavkovic & Stephan, 2025).

Επιπλέον, η ταυτόχρονη αξιολόγηση περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών διαστάσεων μέσω της μεθοδολογίας LCSA συμβάλλει σε μια πιο ολοκληρωμένη αποτίμηση της βιωσιμότητας των κτιριακών κατασκευών. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας

αυτής στο ελληνικό πλαίσιο, με σύγκριση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας, ενισχύει περαιτέρω την πρωτοτυπία της εργασίας, καθώς λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες της εγχώριας πραγματικότητας (United Nations Environment Programme, 2011).

Συνολικά, η συνδυαστική χρήση Dynamic LCA και LCSA, καθώς και η εστίαση στη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών τύπων κατοικιών στην Ελλάδα, αποτελούν βασικά στοιχεία που διαφοροποιούν την παρούσα εργασία από υφιστάμενες μελέτες και ενισχύουν τη συμβολή της στον τομέα της βιώσιμης δόμησης (Asdrubali et al., 2024; Santamouris, 2016).

Επιπλέον, η εργασία συμβάλλει στη διατύπωση κατευθύνσεων σχεδιασμού για περισσότερο βιώσιμες κατοικίες, οι οποίες συνδυάζουν στοιχεία συμβατικής και βιοκλιματικής κατασκευής, με στόχο την επίτευξη αυξημένης ενεργειακής απόδοσης με περιορισμένο επιπλέον κόστος κατασκευής.

1.6 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε πέντε κύρια κεφάλαια και δύο παραρτήματα, τα οποία αναπτύσσονται με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η σταδιακή προσέγγιση και ανάλυση του εξεταζόμενου αντικειμένου.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας, όπου περιγράφονται το γενικό πλαίσιο, ο σκοπός, οι επιμέρους στόχοι, τα ερευνητικά ερωτήματα και η πρωτοτυπία της μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην οποία παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες και μέθοδοι που σχετίζονται με την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), τη Δυναμική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA), την Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) και την Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA), καθώς και στοιχεία σχετικά με τις συμβατικές και βιοκλιματικές κατοικίες.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία της έρευνας, τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων κατοικιών, οι βασικές παραδοχές, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται καθώς και η εφαρμογή των μεθοδολογιών Dynamic LCA, LCC και LCSA.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν και η συγκριτική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας ως προς τις περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις της βιωσιμότητας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, οι περιορισμοί της έρευνας και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα της βιώσιμης δόμησης και της δυναμικής αξιολόγησης κύκλου ζωής.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Συμβατικές κατοικίες

Οι συμβατικές κατοικίες αποτελούν την κυρίαρχη μορφή οικιστικής δόμησης σε παγκόσμιο επίπεδο και χαρακτηρίζονται κυρίως από σχεδιαστικές και κατασκευαστικές πρακτικές που δίνουν έμφαση στη λειτουργικότητα, στο χαμηλό αρχικό κόστος κατασκευής και στην ταχεία υλοποίηση των έργων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο σχεδιασμός τους δεν βασίζεται σε ολοκληρωμένες αρχές περιβαλλοντικής βιωσιμότητας ή βιοκλιματικής προσαρμογής, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις κατά τη φάση λειτουργίας τους (Santamouris, 2016).

Η ενεργειακή κάλυψη των συμβατικών κατοικιών βασίζεται κυρίως σε μηχανικά συστήματα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού, ενώ η περιορισμένη αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών σχεδιασμού, όπως ο φυσικός αερισμός, ο βέλτιστος προσανατολισμός και η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, οδηγεί συχνά σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και υψηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Olgyay, 1963; Givoni, 1994). Παράλληλα, σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται δομικά υλικά και κατασκευαστικές πρακτικές που δεν είναι βελτιστοποιημένες ως προς τη θερμική τους συμπεριφορά, γεγονός που εντείνει τις ενεργειακές απώλειες του κελύφους (International Organization for Standardization, 2017).

Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, σημαντικό μέρος του κτιριακού αποθέματος έχει κατασκευαστεί πριν από την εφαρμογή σύγχρονων κανονισμών θερμομόνωσης και ενεργειακής απόδοσης, παρουσιάζοντας περιορισμένη ενεργειακή αποδοτικότητα και αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις. Η κατάσταση αυτή συνδέεται άμεσα με υψηλή κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, αυξημένο λειτουργικό κόστος και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων (Santamouris, 2016).

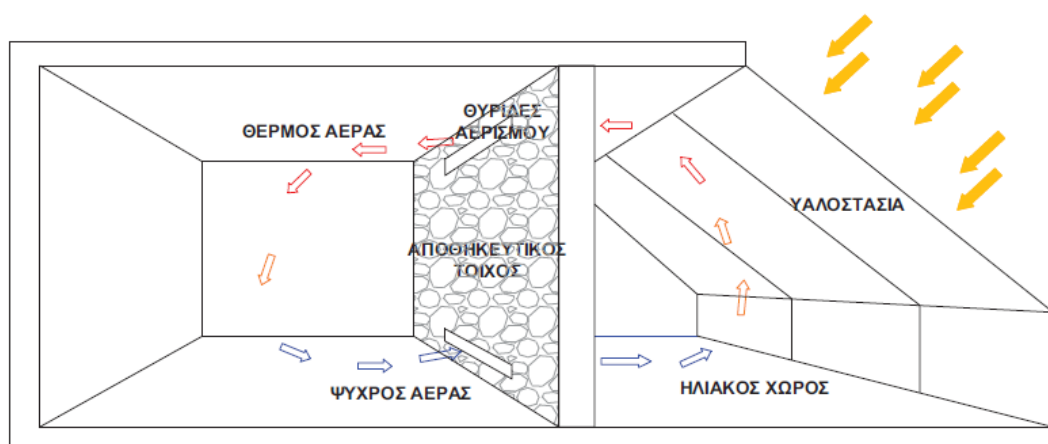
Παρά το γεγονός ότι οι συμβατικές κατοικίες εμφανίζουν συχνά χαμηλότερο αρχικό κόστος κατασκευής σε σχέση με πιο αποδοτικές κατασκευαστικές προσεγγίσεις, όπως οι βιοκλιματικές κατοικίες, η συνολική αξιολόγηση σε επίπεδο κύκλου ζωής αναδεικνύει σημαντικά μειονεκτήματα ως προς την ενεργειακή κατανάλωση, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και τις μακροχρόνιες λειτουργικές δαπάνες (Asdrubali et al., 2024).

Η ανάγκη μετάβασης προς πιο βιώσιμα πρότυπα δόμησης έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη αξιοποίηση ολοκληρωμένων μεθοδολογιών αξιολόγησης, όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), η Δυναμική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA) και η Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA), οι οποίες επιτρέπουν τη συνολική αποτίμηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων των συμβατικών κατασκευών (Slavkovic & Stephan, 2025).

2.2 Βιοκλιματικές κατοικίες

Οι βιοκλιματικές κατοικίες αποτελούν μια σύγχρονη προσέγγιση σχεδιασμού, η οποία στοχεύει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των κτιρίων μέσω της αξιοποίησης των τοπικών κλιματικών συνθηκών και των φυσικών πόρων. Η βασική αρχή του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι η προσαρμογή του κτιρίου στο φυσικό του περιβάλλον, με στόχο τη μείωση των ενεργειακών αναγκών και τη βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης των χρηστών (Olgyay, 1963; Givoni, 1994).

Στον βιοκλιματικό σχεδιασμό ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών, όπως ο κατάλληλος προσανατολισμός του κτιρίου, η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, ο φυσικός αερισμός, η θερμική μάζα των δομικών στοιχείων και η σκίαση. Μέσω των στρατηγικών αυτών επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, καθώς και βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτιριακού κελύφους (Santamouris, 2016).



Εικόνα 3 Παθητικά ηλιακά συστήματα σε βιοκλιματική κατοικία.
Πηγή: TOTEE 20701-1/2017, Σχήμα 3.8.

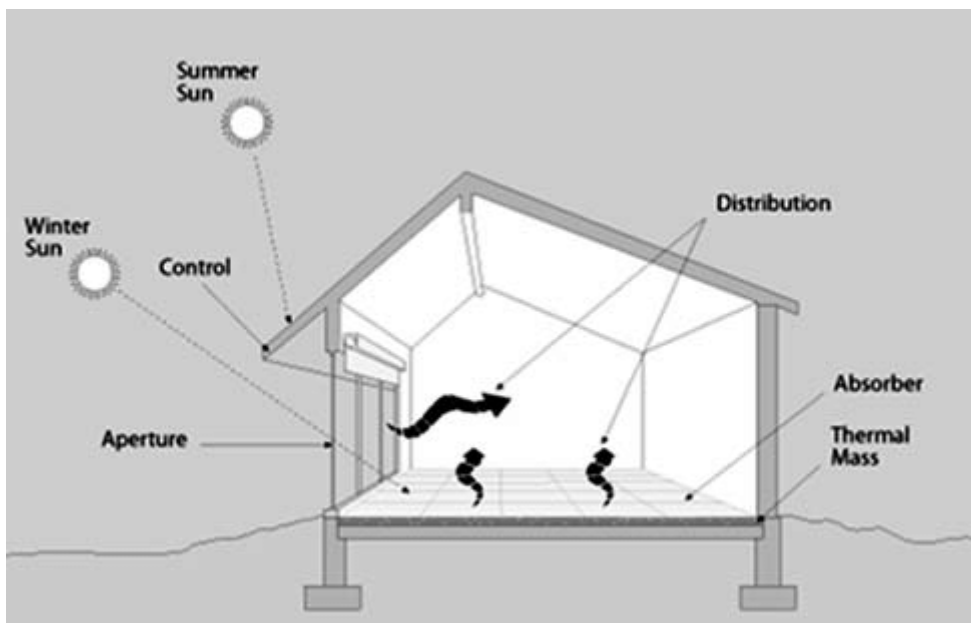
Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3, τα παθητικά ηλιακά συστήματα αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία μέσω στοιχείων όπως οι ηλιακοί χώροι και οι τοίχοι θερμικής μάζας (τοίχοι Trombe), συμβάλλοντας στη μείωση των ενεργειακών αναγκών θέρμανσης και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.

Παράλληλα, οι βιοκλιματικές κατοικίες ενσωματώνουν συχνά υλικά και τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς και συστήματα αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών (Asdrubali et al., 2024). Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της ενεργειακής μετάβασης στον κτιριακό τομέα.

Η αυξανόμενη ανάγκη για περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης και αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής έχει ενισχύσει σημαντικά τον ρόλο των βιοκλιματικών κατοικιών στις σύγχρονες πρακτικές βιώσιμης δόμησης. Ιδιαίτερα σε χώρες με μεσογειακό κλίμα, όπως η Ελλάδα, η εφαρμογή βιοκλιματικών αρχών μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων και στη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης.

Επιπλέον, οι βιοκλιματικές κατοικίες αποτελούν κατάλληλο πεδίο εφαρμογής ολοκληρωμένων μεθοδολογιών αξιολόγησης, όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), η Δυναμική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA) και η Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA), καθώς επιτρέπουν τη συνολική αποτίμηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων των σχεδιαστικών επιλογών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του κτιρίου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του παθητικού ηλιακού σχεδιασμού παρουσιάζονται ενδεικτικά στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4 Βασικές αρχές παθητικού ηλιακού σχεδιασμού σε βιοκλιματική κατοικία.

Πηγή: Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, ο παθητικός ηλιακός σχεδιασμός βασίζεται στον κατάλληλο προσανατολισμό του κτιρίου, στην αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη χειμερινή περίοδο και στον έλεγχο των ηλιακών κερδών κατά το καλοκαίρι μέσω κατάλληλων συστημάτων σκίασης. Παράλληλα, η χρήση θερμικής μάζας συμβάλλει στην αποθήκευση και σταδιακή απόδοση θερμότητας, βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου (Givoni, 1994).

2.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)

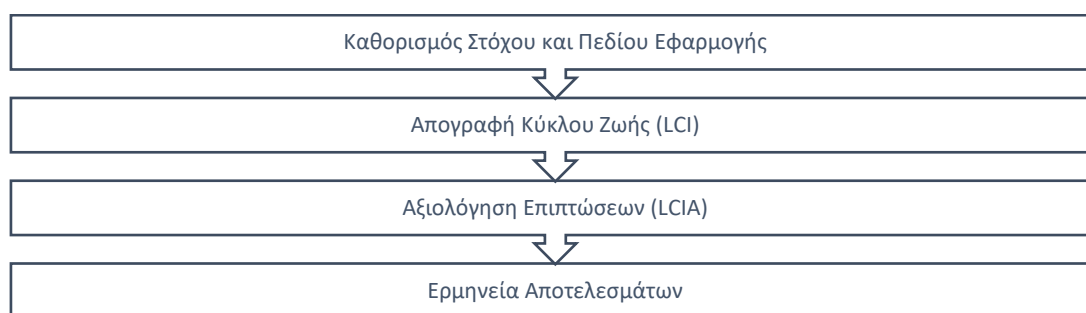
Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μεθοδολογίες αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων προϊόντων, υπηρεσιών και τεχνικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των κτιριακών κατασκευών. Η μέθοδος εξετάζει το σύνολο των σταδίων του κύκλου ζωής ενός συστήματος, από την εξόρυξη των πρώτων υλών και την παραγωγή των δομικών υλικών έως τη φάση λειτουργίας, συντήρησης και τελικής διάθεσης ή ανακύκλωσης (International Organization for Standardization, 2006).

Στον κτιριακό τομέα, η εφαρμογή της LCA έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία, καθώς τα κτίρια συνδέονται με υψηλή κατανάλωση ενέργειας, εκτεταμένη χρήση φυσικών πόρων και

σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια ζωής τους (Asdrubali et al., 2024).

Μέσω της συγκεκριμένης μεθοδολογίας καθίσταται δυνατή η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλα τα στάδια ζωής ενός κτιρίου, επιτρέποντας τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών και κατασκευαστικών επιλογών.

Η μεθοδολογία της LCA βασίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια, όπως αυτά ορίζονται από τα διεθνή πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044. Τα στάδια αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 1:



Σχήμα 1 Βασικά στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)

Το πρώτο στάδιο αφορά τον καθορισμό του στόχου της μελέτης, των ορίων του συστήματος και της λειτουργικής μονάδας (functional unit), η οποία χρησιμοποιείται ως κοινή βάση σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών λύσεων. Στον κτιριακό τομέα, η λειτουργική μονάδα εκφράζεται συνήθως ως επιφάνεια κατοικίας για συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα ζωής, για παράδειγμα ανά τετραγωνικό μέτρο κατοικίας σε διάρκεια ζωής 50 ετών.

Στο στάδιο της απογραφής κύκλου ζωής (LCI) πραγματοποιείται η καταγραφή όλων των εισροών και εκροών του συστήματος, όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι πρώτες ύλες, οι μεταφορές και οι εκπομπές ρύπων. Στη συνέχεια, μέσω της εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων (LCIA), τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται σε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential – GWP), η κατανάλωση φυσικών πόρων και η κατανάλωση ενέργειας (ISO 14044, 2006).

Η εφαρμογή της LCA στα κτίρια επιτρέπει την αξιολόγηση τόσο των ενσωματωμένων επιπτώσεων (embodied impacts), που σχετίζονται με τα δομικά υλικά και τη φάση

κατασκευής, όσο και των λειτουργικών επιπτώσεων (operational impacts), οι οποίες συνδέονται με τη χρήση ενέργειας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κτιρίου. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη στρατηγικών βιώσιμης δόμησης και ενεργειακά αποδοτικών κατοικιών (Asdrubali et al., 2024).

Παράλληλα, η LCA χρησιμοποιείται ευρέως για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογικών και κατασκευαστικών επιλογών, συμβάλλοντας στη λήψη αποφάσεων που οδηγούν σε μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κτιρίων. Μέσω της αξιολόγησης υλικών, ενεργειακών συστημάτων και σχεδιαστικών στρατηγικών, καθίσταται δυνατή η επιλογή λύσεων που παρουσιάζουν βελτιωμένη περιβαλλοντική απόδοση σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους.

Ωστόσο, παρά τη σημαντική συμβολή της στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας των κατασκευών, η παραδοσιακή εφαρμογή της LCA βασίζεται κυρίως σε στατικές παραδοχές και σταθερούς συντελεστές εκπομπών, γεγονός που περιορίζει την ικανότητά της να αποτυπώσει τις χρονικές μεταβολές που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων. Οι περιορισμοί αυτοί οδήγησαν στην ανάπτυξη της Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA), η οποία ενσωματώνει τη χρονική διάσταση στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιριακών κατασκευών (Slavkovic & Stephan, 2025).

2.4 Περιορισμοί της στατικής LCA

Παρά τη σημαντική συμβολή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στην αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων, η παραδοσιακή εφαρμογή της βασίζεται κυρίως σε στατικές παραδοχές, οι οποίες δεν αντανακλούν πλήρως τη δυναμική φύση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας των κτιρίων. Συγκεκριμένα, η συμβατική LCA χρησιμοποιεί σταθερούς συντελεστές εκπομπών και στατικά ενεργειακά δεδομένα για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα ζωής ενός συστήματος, αγνοώντας τις χρονικές μεταβολές που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του (Slavkovic & Stephan, 2025).

Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς στον κτιριακό τομέα, καθώς τα κτίρια χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία συχνά υπερβαίνει τα 50 έτη. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, παράγοντες όπως το ενεργειακό μείγμα, η ενεργειακή πολιτική, οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι συνθήκες χρήσης των κτιρίων

μεταβάλλονται σημαντικά, επηρεάζοντας άμεσα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη λειτουργία τους (Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Ιδιαίτερα σημαντικός θεωρείται ο ρόλος της σταδιακής απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα, καθώς η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγεί σε σταδιακή μείωση των εκπομπών που συνδέονται με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραδοσιακή στατική LCA αδυνατεί να αποτυπώσει επαρκώς αυτή τη χρονική εξέλιξη, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερεκτίμηση είτε σε υποεκτίμηση των πραγματικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων (Su et al., 2021).

Επιπλέον, η συμβατική προσέγγιση της LCA δεν λαμβάνει υπόψη τη χρονική διαφοροποίηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των επιπτώσεών τους στην κλιματική αλλαγή. Οι εκπομπές που πραγματοποιούνται στο παρόν έχουν διαφορετική περιβαλλοντική επίδραση από εκείνες που πραγματοποιούνται σε μεταγενέστερο χρονικό σημείο, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα σημαντική την ενσωμάτωση της χρονικής διάστασης στους υπολογισμούς περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Levasseur et al., 2010).

Παράλληλα, η χρήση στατικών δεδομένων περιορίζει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης μελλοντικών σεναρίων, όπως η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και οι αλλαγές στη συμπεριφορά των χρηστών. Ως αποτέλεσμα, η στατική LCA παρουσιάζει μειωμένη ικανότητα πρόβλεψης της πραγματικής περιβαλλοντικής επίδοσης των κτιρίων σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα (Slavkovic & Stephan, 2025).

Οι περιορισμοί αυτοί οδήγησαν στην ανάπτυξη της Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Assessment – DLCA), η οποία ενσωματώνει τη χρονική διάσταση στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση της πραγματικής επίδοσης των κτιριακών κατασκευών σε βάθος χρόνου.

2.5 Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα

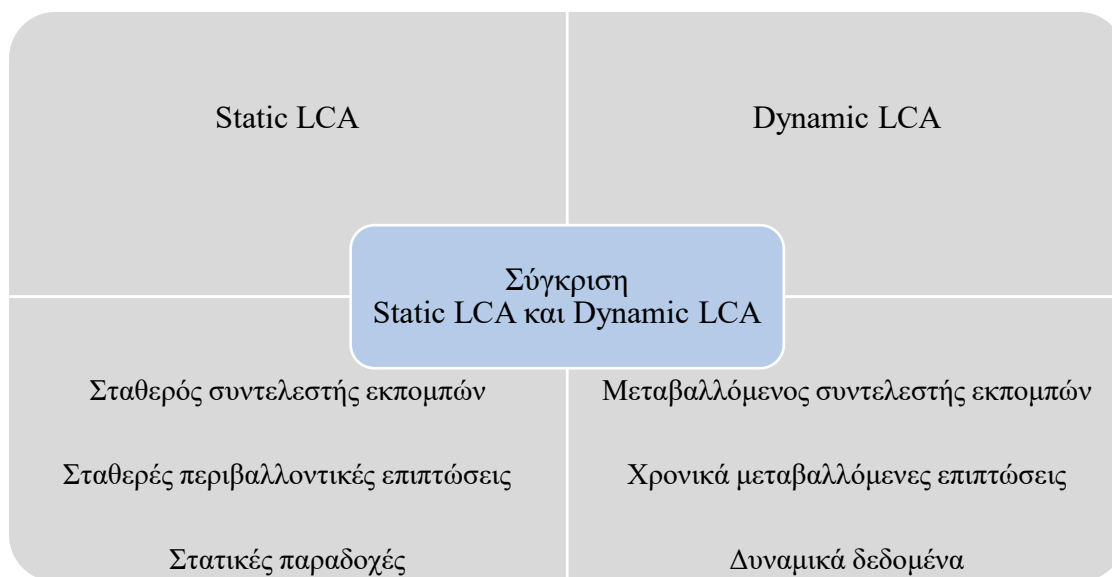
2.5.1 Βασικές αρχές Dynamic LCA

Η Δυναμική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Assessment – DLCA) αποτελεί εξέλιξη της παραδοσιακής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, εισάγοντας τη χρονική διάσταση στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σε αντίθεση με τη συμβατική στατική προσέγγιση, όπου οι παράμετροι θεωρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός

συστήματος, η Dynamic LCA λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές που πραγματοποιούνται στο χρόνο, επιτρέποντας μια πιο ρεαλιστική και αξιόπιστη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Slavkovic & Stephan, 2025).

Η ανάγκη ανάπτυξης της δυναμικής προσέγγισης προκύπτει από το γεγονός ότι πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την περιβαλλοντική απόδοση των κτιρίων μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια ζωής τους. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, οι τεχνολογικές αλλαγές, η αυξανόμενη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι μεταβολές στη ζήτηση ενέργειας και οι αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας των κτιρίων (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020).

Στο πλαίσιο της Dynamic LCA, οι εκπομπές και οι ενεργειακές ροές κατανέμονται χρονικά, επιτρέποντας την αξιολόγηση των επιπτώσεων σε διαφορετικά χρονικά στάδια. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στον κτιριακό τομέα, όπου η διάρκεια ζωής των κατασκευών μπορεί να υπερβαίνει τις πέντε δεκαετίες, καθιστώντας απαραίτητη τη συνεκτίμηση της χρονικής εξέλιξης των περιβαλλοντικών παραμέτρων (Slavkovic & Stephan, 2025).



Σχήμα 2 Σύγκριση της συμβατικής (Static LCA) και της δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (DLCA).

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2, η Dynamic LCA διαφοροποιείται από τη συμβατική LCA μέσω της ενσωμάτωσης χρονικά μεταβαλλόμενων δεδομένων και συντελεστών εκπομπών, επιτρέποντας ακριβέστερη αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων (Slavkovic & Stephan, 2025).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η ενσωμάτωση της σταδιακής απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα, καθώς η μελλοντική μείωση της έντασης άνθρακα του ηλεκτρικού δικτύου επηρεάζει άμεσα τις λειτουργικές εκπομπές των κτιρίων. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η ενσωμάτωση χρονικά μεταβαλλόμενων δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων σε σχέση με τη συμβατική στατική LCA, σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και άνω του 50% (Su et al., 2021).

Παράλληλα, η Dynamic LCA επιτρέπει τη σύνδεση της ανάλυσης με μελλοντικά σενάρια ενεργειακής μετάβασης, βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών, προσδίδοντας προβλεπτικό χαρακτήρα στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων. Με τον τρόπο αυτό, η μεθοδολογία μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικότερα τη λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων και ενεργειακά αποδοτικών κατοικιών (Slavkovic & Stephan, 2025).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της δυναμικής προσέγγισης, η εφαρμογή της συνοδεύεται από αυξημένες απαιτήσεις σε δεδομένα και μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η ανάγκη ύπαρξης αξιόπιστων χρονικών δεδομένων, σεναρίων ενεργειακής μετάβασης και δυναμικών συντελεστών εκπομπών αποτελεί μία από τις βασικές προκλήσεις για την ευρύτερη εφαρμογή της μεθοδολογίας στον κτιριακό τομέα (Levasseur et al., 2010).

Συνολικά, η Dynamic LCA αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για την ακριβέστερη αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των κτιρίων σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα, ενσωματώνοντας τη χρονική εξέλιξη κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα των κατασκευών.

2.5.2 Dynamic LCI

Η Δυναμική Απογραφή Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Inventory – Dynamic LCI ή LCI_{dyn}) αποτελεί βασικό στοιχείο της Dynamic LCA και αφορά τη χρονική κατανομή των εισροών, εκροών και εκπομπών που σχετίζονται με ένα σύστημα κατά τη διάρκεια ζωής

του. Σε αντίθεση με τη συμβατική απογραφή κύκλου ζωής, όπου οι εκπομπές και οι ενεργειακές ροές θεωρούνται σταθερές και συγκεντρωτικές, η δυναμική προσέγγιση λαμβάνει υπόψη τη χρονική στιγμή κατά την οποία πραγματοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις (Slavkovic & Stephan, 2025).

Στον κτιριακό τομέα, η εφαρμογή της Dynamic LCI θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής των κατασκευών και της συνεχούς μεταβολής των ενεργειακών και περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι λειτουργικές εκπομπές ενός κτιρίου δεν παραμένουν σταθερές στο χρόνο, αλλά επηρεάζονται από την εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των συστημάτων και τις αλλαγές στη συμπεριφορά των χρηστών (Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Η δυναμική απογραφή επιτρέπει την κατανομή των εκπομπών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, καθιστώντας δυνατή την ενσωμάτωση μελλοντικών σεναρίων ενεργειακής μετάβασης και σταδιακής απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού δικτύου. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση κατοικιών μεγάλης διάρκειας ζωής, όπου οι λειτουργικές εκπομπές επηρεάζονται σημαντικά από τις μακροχρόνιες μεταβολές του ενεργειακού τομέα (Su et al., 2021).

Επιπλέον, η Dynamic LCI επιτρέπει τη διαφοροποίηση μεταξύ άμεσων και μελλοντικών εκπομπών, γεγονός που οδηγεί σε ακριβέστερη αποτύπωση των πραγματικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, η χρήση χρονικά εξαρτώμενων δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων σε σχέση με τη συμβατική στατική απογραφή, ιδιαίτερα σε μελέτες που εξετάζουν μακροχρόνιους χρονικούς ορίζοντες (Slavkovic & Stephan, 2025).

Παράλληλα, η εφαρμογή της Dynamic LCI συνδέεται στενά με τη χρήση ψηφιακών εργαλείων, σεναρίων πρόβλεψης και δυναμικών βάσεων δεδομένων, τα οποία επιτρέπουν τη συνεχή ενημέρωση των περιβαλλοντικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια ζωής ενός κτιρίου. Η εξέλιξη αυτή ενισχύει σημαντικά τη δυνατότητα ανάπτυξης πιο αξιόπιστων και ρεαλιστικών μοντέλων αξιολόγησης βιωσιμότητας στον κατασκευαστικό τομέα.

2.5.3 Dynamic LCIA

Η Δυναμική Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Impact Assessment – Dynamic LCIA ή $LCIA_{dyn}$) αποτελεί εξέλιξη της συμβατικής

εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στοχεύει στην ενσωμάτωση της χρονικής διάστασης κατά την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ενός συστήματος. Σε αντίθεση με τη συμβατική LCIA, όπου οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις θεωρούνται χρονικά ανεξάρτητες, η δυναμική προσέγγιση λαμβάνει υπόψη τον χρόνο πραγματοποίησης των εκπομπών και τη μεταβολή των επιπτώσεών τους στο περιβάλλον (Levasseur et al., 2010).

Η βασική αρχή της Dynamic LCIA είναι ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας εκπομπής δεν παραμένουν σταθερές διαχρονικά. Για παράδειγμα, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που πραγματοποιούνται στο παρόν έχουν διαφορετική συμβολή στην κλιματική αλλαγή σε σχέση με εκπομπές που πραγματοποιούνται αρκετές δεκαετίες αργότερα. Ως αποτέλεσμα, η χρονική κατανομή των εκπομπών επηρεάζει σημαντικά την τελική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Levasseur et al., 2010).

Στον κτιριακό τομέα, η εφαρμογή της Dynamic LCIA είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής των κτιρίων και της συνεχούς μεταβολής των ενεργειακών και περιβαλλοντικών συνθηκών. Η σταδιακή απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα, η αυξανόμενη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι τεχνολογικές εξελίξεις επηρεάζουν άμεσα την ένταση άνθρακα της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός κτιρίου (Su et al., 2021).

Η Dynamic LCIA επιτρέπει τη χρήση χρονικά μεταβαλλόμενων συντελεστών χαρακτηρισμού (dynamic characterization factors), οι οποίοι αποτυπώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική συμβολή των εκπομπών στην κλιματική αλλαγή και σε άλλες περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τη μεθοδολογία περισσότερο ρεαλιστική σε σχέση με τη συμβατική στατική προσέγγιση (Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, η εφαρμογή της Dynamic LCIA μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων συγκριτικά με τη συμβατική LCIA, ιδιαίτερα σε μελέτες μεγάλης χρονικής διάρκειας, όπως αυτές που αφορούν κτίρια και υποδομές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι αποκλίσεις μεταξύ δυναμικής και στατικής προσέγγισης έχουν ξεπεράσει το 50%, επιβεβαιώνοντας τη σημασία της χρονικής διάστασης στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων (Slavkovic & Stephan, 2025).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της Dynamic LCIA, η εφαρμογή της συνοδεύεται από αυξημένες απαιτήσεις σε δεδομένα, ανάγκη ύπαρξης δυναμικών βάσεων δεδομένων και

μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Επιπλέον, εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμοί ως προς την τυποποίηση της μεθοδολογίας και τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων χρονικών συντελεστών χαρακτηρισμού, γεγονός που αποτελεί αντικείμενο σύγχρονης ερευνητικής δραστηριότητας (Slavkovic & Stephan, 2025).

2.5.4 Dynamic vs Static LCA

Η βασική διαφοροποίηση μεταξύ της συμβατικής στατικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (static LCA) και της Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA) εντοπίζεται στον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζεται η χρονική διάσταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η στατική προσέγγιση θεωρεί ότι οι παράμετροι του συστήματος, όπως οι συντελεστές εκπομπών, η κατανάλωση ενέργειας και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος ή κτιρίου. Αντίθετα, η Dynamic LCA λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξέλιξη αυτών των παραμέτρων και ενσωματώνει μεταβολές που πραγματοποιούνται σε βάθος χρόνου (Slavkovic & Stephan, 2025).

Στη συμβατική στατική LCA, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου υπολογίζονται συνήθως με χρήση σταθερών μέσων τιμών για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα της ανάλυσης. Η προσέγγιση αυτή απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία αξιολόγησης, ωστόσο δεν αποτυπώνει τις πραγματικές συνθήκες που μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων, όπως η σταδιακή απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα, οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι αλλαγές στην ενεργειακή κατανάλωση (Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Αντίθετα, η Dynamic LCA χρησιμοποιεί χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα και δυναμικούς συντελεστές εκπομπών, επιτρέποντας τη συνεκτίμηση μελλοντικών μεταβολών του ενεργειακού μίγματος και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τη δυναμική προσέγγιση περισσότερο ρεαλιστική και κατάλληλη για εφαρμογές μεγάλης χρονικής διάρκειας, όπως οι κτιριακές κατασκευές (Su et al., 2021).

Ιδιαίτερα στον κτιριακό τομέα, οι αποκλίσεις μεταξύ στατικής και δυναμικής προσέγγισης μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η ενσωμάτωση της χρονικής διάστασης μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων που σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβαίνουν το 50%, ενώ έχουν αναφερθεί ακόμη μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σενάρια μακροχρόνιας ενεργειακής μετάβασης (Slavkovic & Stephan, 2025).

Επιπλέον, η Dynamic LCA παρουσιάζει αυξημένη δυνατότητα ενσωμάτωσης μελλοντικών σεναρίων, όπως η αύξηση της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και οι αλλαγές στις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Αντίθετα, η static LCA περιορίζεται κυρίως στην αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, γεγονός που μειώνει την ικανότητά της να προβλέπει τη μελλοντική περιβαλλοντική συμπεριφορά των κτιρίων.

Παρά τα πλεονεκτήματα της δυναμικής προσέγγισης, η εφαρμογή της συνοδεύεται από αυξημένες απαιτήσεις σε δεδομένα, μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα και ανάγκη ανάπτυξης αξιόπιστων μελλοντικών σεναρίων. Ωστόσο, η συνεχής ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων, δυναμικών βάσεων δεδομένων και τεχνολογιών προσομοίωσης ενισχύει σημαντικά τη δυνατότητα ευρύτερης εφαρμογής της Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα (Slavkovic & Stephan, 2025).

2.5.5 Dynamic electricity grid mix

Η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής (electricity grid mix) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη δυναμική περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων. Στη συμβατική στατική Ανάλυση Κύκλου Ζωής χρησιμοποιούνται συνήθως σταθεροί συντελεστές εκπομπών για την ηλεκτρική ενέργεια, θεωρώντας ότι το ενεργειακό μίγμα παραμένει αμετάβλητο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Ωστόσο, στην πραγματικότητα το ενεργειακό σύστημα μεταβάλλεται συνεχώς, λόγω της αυξανόμενης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της σταδιακής απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής και της απόσυρσης μονάδων υψηλών εκπομπών άνθρακα (Su et al., 2021).

Η Dynamic LCA ενσωματώνει χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέποντας την ακριβέστερη αποτύπωση των πραγματικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία των κτιρίων. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για κατοικίες μεγάλης διάρκειας ζωής, καθώς οι λειτουργικές εκπομπές τους επηρεάζονται άμεσα από τις μακροχρόνιες μεταβολές του ενεργειακού τομέα (Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων για το ενεργειακό μίγμα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων συγκριτικά με τη συμβατική static LCA. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι αποκλίσεις μεταξύ στατικής και

δυναμικής προσέγγισης ξεπερνούν το 50%, ιδιαίτερα σε σενάρια που εξετάζουν μακροχρόνια ενεργειακή μετάβαση και υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Slavkovic & Stephan, 2025).

Η σημασία του dynamic electricity grid mix είναι ιδιαίτερα αυξημένη στις βιοκλιματικές και ενεργειακά αποδοτικές κατοικίες, όπου οι λειτουργικές ενεργειακές απαιτήσεις είναι μειωμένες και η περιβαλλοντική επίδοση επηρεάζεται σημαντικά από τη μελλοντική ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας των κατοικιών απαιτεί τη συνεκτίμηση μελλοντικών σεναρίων ενεργειακής μετάβασης και σταδιακής απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού δικτύου.

Παράλληλα, η δυναμική προσέγγιση επιτρέπει την ανάπτυξη σεναρίων που σχετίζονται με τις εθνικές και ευρωπαϊκές πολιτικές για την κλιματική ουδετερότητα, τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και τη μετάβαση σε συστήματα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τη Dynamic LCA ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τον στρατηγικό σχεδιασμό βιώσιμων κατοικιών και την υποστήριξη πολιτικών ενεργειακής μετάβασης στον κτιριακό τομέα (European Commission, 2020).

2.6 Εφαρμογές της Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα

2.6.1 Κατοικίες

Η εφαρμογή της Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στον οικιστικό τομέα παρουσιάζει αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, καθώς οι κατοικίες συνδέονται με υψηλή κατανάλωση ενέργειας, σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και εκτεταμένη χρήση φυσικών πόρων κατά τη διάρκεια ζωής τους. Η ανάγκη ανάπτυξης πιο ρεαλιστικών και ακριβών μεθοδολογιών περιβαλλοντικής αξιολόγησης έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη αξιοποίηση της Dynamic LCA στις κατοικίες και γενικότερα στις κτιριακές κατασκευές (Asdrubali et al., 2024).

Οι κατοικίες αποτελούν ιδιαίτερα κατάλληλο πεδίο εφαρμογής της Dynamic LCA λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους, η οποία συχνά υπερβαίνει τα 50 έτη. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος μεταβάλλονται σημαντικά παράγοντες όπως το ενεργειακό μίγμα, οι τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, οι συνθήκες λειτουργίας των κτιρίων και οι ενεργειακές απαιτήσεις των χρηστών, επηρεάζοντας άμεσα τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση των κατοικιών (Slavkovic & Stephan, 2025).

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η εφαρμογή της Dynamic LCA στις κατοικίες μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα συγκριτικά με τη συμβατική static LCA, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που εξετάζονται μακροχρόνια σενάρια ενεργειακής μετάβασης και σταδιακής απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα. Σε αρκετές έρευνες έχουν καταγραφεί σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ στατικής και δυναμικής προσέγγισης, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της χρονικής διάστασης στην αξιολόγηση κατοικιών (Su et al., 2021).

Η Dynamic LCA χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για τη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικών και βιοκλιματικών κατοικιών, καθώς επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία, τη συντήρηση και τη χρήση των κτιρίων σε βάθος χρόνου. Μέσω της δυναμικής προσέγγισης καθίσταται δυνατή η εκτίμηση των πραγματικών περιβαλλοντικών οφελών που προκύπτουν από την εφαρμογή στρατηγικών ενεργειακής αποδοτικότητας, παθητικού σχεδιασμού και αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Παράλληλα, η εφαρμογή της Dynamic LCA στον οικιστικό τομέα συνδέεται στενά με τις σύγχρονες πολιτικές βιώσιμης ανάπτυξης και ενεργειακής μετάβασης, καθώς επιτρέπει τη συνεκτίμηση μελλοντικών σεναρίων που σχετίζονται με τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την επίτευξη κτιρίων χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τη Dynamic LCA ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για τον σχεδιασμό βιώσιμων κατοικιών και την υποστήριξη στρατηγικών κλιματικής ουδετερότητας στον κτιριακό τομέα (European Commission, 2020).

2.6.2 Λειτουργική κατανάλωση ενέργειας

Η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες περιβαλλοντικής επιβάρυνσης των κατοικιών κατά τη διάρκεια ζωής τους. Η ενέργεια που απαιτείται για θέρμανση, ψύξη, αερισμό, φωτισμό και λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών συνδέεται άμεσα με σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και υψηλή κατανάλωση φυσικών πόρων, ιδιαίτερα σε κατοικίες χαμηλής ενεργειακής απόδοσης (Asdrubali et al., 2024).

Στις συμβατικές κατοικίες, η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας αντιπροσωπεύει συχνά το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής ενός κτιρίου. Παράγοντες όπως η ανεπαρκής θερμομόνωση, ο περιορισμένος βιοκλιματικός

σχεδιασμός, η χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητα των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων και η αυξημένη ανάγκη μηχανικής θέρμανσης και ψύξης οδηγούν σε αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις κατά τη φάση λειτουργίας των κατοικιών (Santamouris, 2016).

Η Dynamic LCA επιτρέπει την ακριβέστερη αξιολόγηση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας, καθώς ενσωματώνει τη χρονική μεταβολή του ενεργειακού μίγματος και των συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μακροχρόνιες αναλύσεις κατοικιών, όπου η περιβαλλοντική επίδοση επηρεάζεται σημαντικά από τη σταδιακή απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα και την αυξανόμενη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Su et al., 2021).

Παράλληλα, η Dynamic LCA επιτρέπει την ενσωμάτωση σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης και τεχνολογικής εξέλιξης, όπως η εγκατάσταση ενεργειακά αποδοτικότερων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, η βελτίωση της θερμομόνωσης και η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η πιο ρεαλιστική αποτύπωση της πραγματικής ενεργειακής συμπεριφοράς των κατοικιών σε βάθος χρόνου.

Στις βιοκλιματικές κατοικίες, η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας είναι συνήθως σημαντικά μειωμένη λόγω της αξιοποίησης παθητικών στρατηγικών σχεδιασμού και της βελτιωμένης ενεργειακής απόδοσης του κελύφους. Ωστόσο, η ακριβής αποτίμηση των περιβαλλοντικών οφελών απαιτεί τη συνεκτίμηση των μελλοντικών μεταβολών του ενεργειακού συστήματος, γεγονός που καθιστά τη Dynamic LCA ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο αξιολόγησης βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα (Slavkovic & Stephan, 2025).

2.6.3 Ενεργειακές αναβαθμίσεις και ανακαινίσεις

Οι ενεργειακές αναβαθμίσεις και οι ανακαινίσεις κατοικιών αποτελούν βασική στρατηγική για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον κτιριακό τομέα. Ιδιαίτερα στις χώρες με παλαιό κτιριακό απόθεμα, όπως η Ελλάδα, μεγάλο ποσοστό κατοικιών έχει κατασκευαστεί πριν από την εφαρμογή σύγχρονων κανονισμών θερμομόνωσης και ενεργειακής απόδοσης, παρουσιάζοντας υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και αυξημένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Santamouris, 2016).

Οι ενεργειακές παρεμβάσεις περιλαμβάνουν συνήθως τη βελτίωση της θερμομόνωσης του κελύφους, την αντικατάσταση κουφωμάτων, την αναβάθμιση των συστημάτων θέρμανσης

και ψύξης, την εγκατάσταση αποδοτικότερων ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων και την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι παρεμβάσεις αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας και των αντίστοιχων περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατοικιών (Asdrubali et al., 2024).

Η εφαρμογή της Dynamic LCA στις ενεργειακές αναβαθμίσεις παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών οφελών των παρεμβάσεων σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα. Σε αντίθεση με τη συμβατική static LCA, η δυναμική προσέγγιση λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, τις μελλοντικές τεχνολογικές αλλαγές και τη σταδιακή απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα, παρέχοντας πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σχετικά με τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση των ανακαινίσεων (Su et al., 2021).

Παράλληλα, η Dynamic LCA επιτρέπει την αξιολόγηση του χρόνου απόσβεσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τα νέα υλικά και τις κατασκευαστικές παρεμβάσεις. Παρότι οι ενεργειακές αναβαθμίσεις οδηγούν συνήθως σε μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας, η παραγωγή και εγκατάσταση νέων υλικών ενδέχεται να αυξήσει προσωρινά τις ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα (embodied carbon). Η δυναμική προσέγγιση καθιστά δυνατή την ακριβέστερη αποτίμηση αυτής της ισορροπίας σε βάθος χρόνου (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020).

Η αξιολόγηση ενεργειακών αναβαθμίσεων μέσω Dynamic LCA θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη διαμόρφωση στρατηγικών βιώσιμης ανακαίνισης και για την υποστήριξη πολιτικών ενεργειακής μετάβασης στον κτιριακό τομέα. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης μελλοντικών σεναρίων ενεργειακής εξέλιξης συμβάλλει στη λήψη πιο αποτελεσματικών αποφάσεων σχετικά με την επιλογή τεχνολογιών και παρεμβάσεων χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

2.6.4 Κλιματική αλλαγή

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες συμβολής στην κλιματική αλλαγή, καθώς συνδέεται με υψηλή κατανάλωση ενέργειας και σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας των κτιρίων. Σύμφωνα με διεθνείς μελέτες, οι κατοικίες και γενικότερα τα κτίρια ευθύνονται για σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας ενεργειακής

κατανάλωσης και των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Asdrubali et al., 2024).

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη στρατηγικών βιώσιμης δόμησης και ενεργειακής μετάβασης, με στόχο τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και την επίτευξη κτιρίων χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Στο πλαίσιο αυτό, η εφαρμογή μεθοδολογιών όπως η Dynamic LCA αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα (Slavkovic & Stephan, 2025).

Η συμβατική static LCA παρουσιάζει περιορισμούς ως προς την αξιολόγηση της συμβολής των κτιρίων στην κλιματική αλλαγή, καθώς βασίζεται σε σταθερούς συντελεστές εκπομπών και δεν λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξέλιξη του ενεργειακού τομέα. Αντίθετα, η Dynamic LCA ενσωματώνει μεταβολές όπως η σταδιακή απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής, η αυξανόμενη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ενέργειας, προσφέροντας πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σχετικά με τις μελλοντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κατοικιών (Su et al., 2021).

Παράλληλα, η Dynamic LCA επιτρέπει τη σύνδεση της περιβαλλοντικής αξιολόγησης με μελλοντικά σενάρια κλιματικής πολιτικής και ενεργειακής μετάβασης, όπως οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει ουσιαστικά στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον σχεδιασμό βιώσιμων κατοικιών, την επιλογή υλικών χαμηλών εκπομπών άνθρακα και την εφαρμογή στρατηγικών ενεργειακής αποδοτικότητας (European Commission, 2020).

Επιπλέον, η εφαρμογή της Dynamic LCA επιτρέπει την ακριβέστερη αποτίμηση των μακροχρόνιων περιβαλλοντικών οφελών που προκύπτουν από τις βιοκλιματικές κατοικίες και τις ενεργειακές αναβαθμίσεις. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης χρονικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων καθιστά τη μεθοδολογία ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για την ανάπτυξη στρατηγικών περιορισμού της κλιματικής αλλαγής στον κτιριακό τομέα και για την προώθηση βιώσιμων προτύπων δόμησης.

2.7 BIM, Τεχνητή Νοημοσύνη και Ψηφιακά Δίδυμα στη Dynamic LCA

Η συνεχής ανάπτυξη ψηφιακών τεχνολογιών έχει επηρεάσει σημαντικά τις σύγχρονες μεθοδολογίες περιβαλλοντικής αξιολόγησης στον κτιριακό τομέα. Η ενσωμάτωση

εργαλείων όπως το Building Information Modeling (BIM), η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) και τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στη Dynamic Life Cycle Assessment συμβάλλει στην ανάπτυξη πιο ακριβών, αυτοματοποιημένων και δυναμικών μοντέλων αξιολόγησης βιωσιμότητας των κτιρίων (Asdrubali et al., 2024).

Το BIM αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες ψηφιακής διαχείρισης πληροφοριών στον κατασκευαστικό τομέα. Μέσω της δημιουργίας ψηφιακών μοντέλων κτιρίων καθίσταται δυνατή η συγκέντρωση και διαχείριση δεδομένων που σχετίζονται με τα υλικά, τη γεωμετρία, τα ενεργειακά χαρακτηριστικά και τις τεχνικές προδιαγραφές των κατασκευών. Η σύνδεση του BIM με τη Dynamic LCA επιτρέπει την αυτοματοποιημένη εξαγωγή δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής (LCI), βελτιώνοντας σημαντικά την ακρίβεια και την ταχύτητα των περιβαλλοντικών αξιολογήσεων (Soust-Verdaguer et al., 2017).

Παράλληλα, η αξιοποίηση τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης συμβάλλει στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης ενεργειακής κατανάλωσης, βελτιστοποίησης του σχεδιασμού και ανάλυσης μελλοντικών σεναρίων ενεργειακής μετάβασης. Η AI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, την αναγνώριση προτύπων κατανάλωσης ενέργειας και την υποστήριξη διαδικασιών λήψης αποφάσεων σχετικά με τη βιωσιμότητα των κατοικιών (Lu et al., 2020).

Ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins), τα οποία αποτελούν δυναμικά ψηφιακά μοντέλα πραγματικών κτιρίων που ενημερώνονται συνεχώς μέσω δεδομένων λειτουργίας και αισθητήρων. Η σύνδεση των Digital Twins με τη Dynamic LCA επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των κατοικιών και τη δυναμική προσαρμογή των μοντέλων αξιολόγησης βάσει πραγματικών δεδομένων λειτουργίας (Boje et al., 2020).

Η ενσωμάτωση των παραπάνω τεχνολογιών συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των δυναμικών περιβαλλοντικών αξιολογήσεων, επιτρέποντας την ανάπτυξη περισσότερο ρεαλιστικών μοντέλων βιωσιμότητας για τον κτιριακό τομέα. Παράλληλα, οι τεχνολογίες αυτές ενισχύουν τη δυνατότητα ανάπτυξης σεναρίων ενεργειακής μετάβασης και υποστηρίζουν τον σχεδιασμό κατοικιών χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των ψηφιακών τεχνολογιών, εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμοί που σχετίζονται με τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων, τη

διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων και την αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα των μοντέλων. Ωστόσο, η συνεχής ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και η αυξανόμενη ενσωμάτωσή τους στις διαδικασίες περιβαλλοντικής αξιολόγησης αναμένεται να ενισχύσουν σημαντικά τη μελλοντική εφαρμογή της Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα (Slavkovic & Stephan, 2025).

2.8 Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC)

Η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost Analysis – LCC) αποτελεί μία από τις βασικότερες μεθοδολογίες οικονομικής αξιολόγησης στον κτιριακό τομέα και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του συνολικού κόστους ενός κτιρίου σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του. Η προσέγγιση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στο αρχικό κόστος κατασκευής, αλλά περιλαμβάνει επίσης το λειτουργικό κόστος, το κόστος συντήρησης, αντικατάστασης και το κόστος τέλους ζωής του κτιρίου (Fuller & Petersen, 1996).

Η εφαρμογή της LCC στον κτιριακό τομέα παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία, καθώς τα κτίρια χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής και σημαντικές λειτουργικές δαπάνες που συχνά υπερβαίνουν το αρχικό κόστος κατασκευής. Ειδικά στις κατοικίες, το κόστος θέρμανσης, ψύξης, κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και συντήρησης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συνολική οικονομική επίδοση ενός κτιρίου σε βάθος χρόνου (Asdrubali et al., 2024).

Η μεθοδολογία της LCC βασίζεται συνήθως σε τεχνικές οικονομικής ανάλυσης παρούσας αξίας, μέσω των οποίων οι μελλοντικές χρηματοροές προεξοφλούνται σε παρούσες τιμές χρησιμοποιώντας κατάλληλο προεξοφλητικό επιτόκιο. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών και τεχνολογικών επιλογών με βάση το συνολικό οικονομικό τους κόστος κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου (ISO 15686-5, 2017).

Στις βιοκλιματικές κατοικίες, το αρχικό κόστος κατασκευής είναι συχνά αυξημένο λόγω της εφαρμογής αποδοτικότερων υλικών, βελτιωμένων συστημάτων θερμομόνωσης και τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας. Ωστόσο, η μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας και των απαιτήσεων συντήρησης μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερο συνολικό κόστος κύκλου ζωής συγκριτικά με τις συμβατικές κατοικίες (Asdrubali et al., 2024).

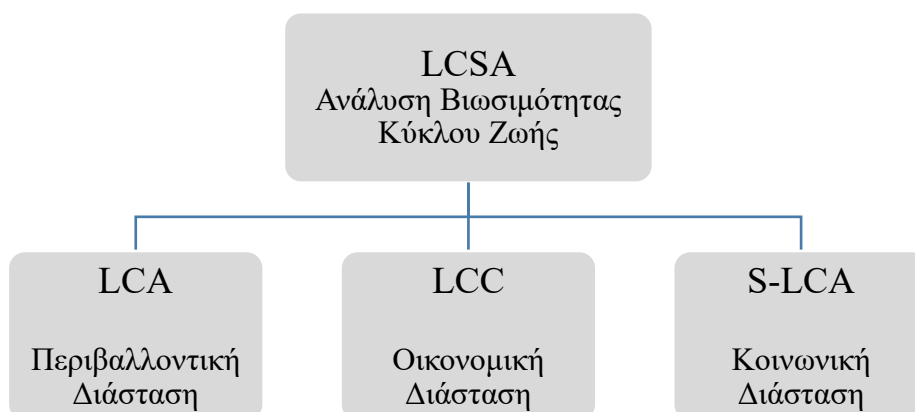
Παράλληλα, η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), επιτρέποντας την ταυτόχρονη αξιολόγηση περιβαλλοντικών και οικονομικών παραμέτρων. Ο συνδυασμός αυτός αποτελεί βασικό στοιχείο ολοκληρωμένων προσεγγίσεων βιωσιμότητας, όπως η Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA), η οποία εξετάζει συνολικά τις περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις των κτιριακών κατασκευών.

Η εφαρμογή της LCC θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον σχεδιασμό βιώσιμων κατοικιών, την επιλογή ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών και την αξιολόγηση επενδύσεων στον κτιριακό τομέα. Μέσω της προσέγγισης αυτής καθίσταται δυνατή η επιλογή λύσεων που παρουσιάζουν όχι μόνο μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αλλά και βελτιωμένη οικονομική βιωσιμότητα σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα.

2.9 Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA)

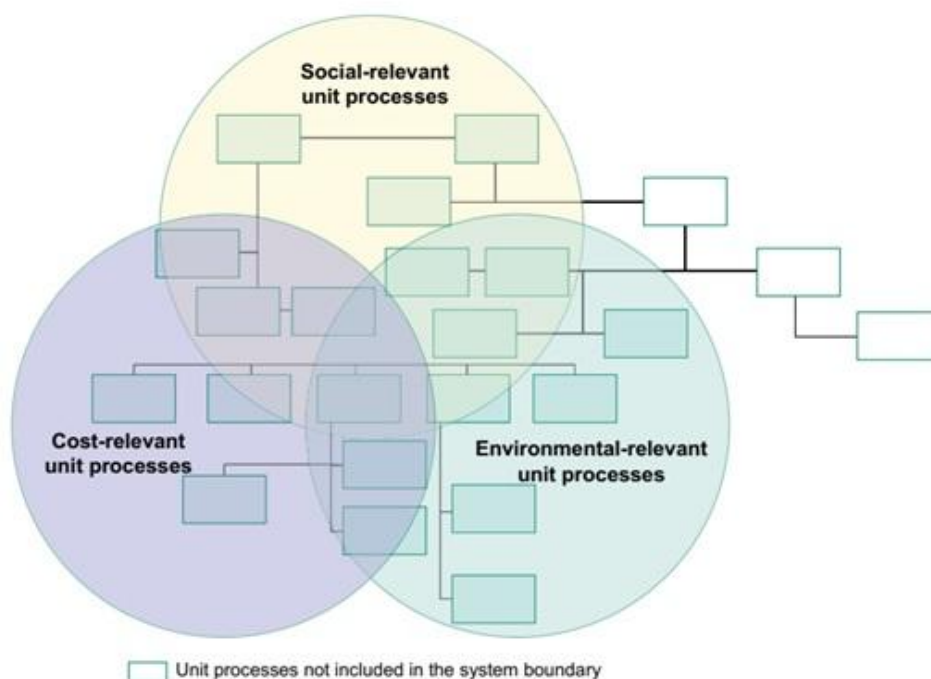
Η Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA) αποτελεί μία ολοκληρωμένη προσέγγιση αξιολόγησης βιωσιμότητας, η οποία συνδυάζει την περιβαλλοντική αξιολόγηση μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), την οικονομική αξιολόγηση μέσω της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) και την κοινωνική αξιολόγηση μέσω της Κοινωνικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Social Life Cycle Assessment – S-LCA). Στόχος της μεθοδολογίας είναι η συνολική αποτίμηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων ενός συστήματος σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του (UNEP, 2011).

Η δομή της μεθοδολογίας LCSA παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3 Δομή της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA).

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3, η μεθοδολογία LCSA συνδυάζει την περιβαλλοντική αξιολόγηση μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), την οικονομική αξιολόγηση μέσω της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) και την κοινωνική αξιολόγηση μέσω της Κοινωνικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (S-LCA), παρέχοντας μία ολοκληρωμένη προσέγγιση εκτίμησης της βιωσιμότητας των κατοικιών.



Σχήμα 4 Πλαίσιο ορίων συστήματος της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA).

Πηγή: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. (2011). Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products. Paris: United Nations Environment Programme (UNEP), **Figure 14**, σ. 41.

Η ανάγκη ανάπτυξης ολοκληρωμένων μεθοδολογιών βιωσιμότητας έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα στον κτιριακό τομέα, όπου οι κατασκευές επηρεάζουν άμεσα το περιβάλλον, την οικονομία και την ποιότητα ζωής των χρηστών. Οι κατοικίες συνδέονται με υψηλή κατανάλωση ενέργειας, σημαντικές οικονομικές απαιτήσεις και κοινωνικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την υγεία, την άνεση και την ποιότητα διαβίωσης (Asdrubali et al., 2024).

Η περιβαλλοντική διάσταση της LCSA βασίζεται κυρίως στην εφαρμογή της LCA και περιλαμβάνει την αξιολόγηση επιπτώσεων όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η κατανάλωση ενέργειας, η χρήση φυσικών πόρων και οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που σχετίζονται με τα δομικά υλικά και τη λειτουργία των κατοικιών. Παράλληλα, η οικονομική διάσταση βασίζεται στην εφαρμογή της LCC και εξετάζει το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των κτιρίων, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών κατασκευής, λειτουργίας, συντήρησης και τέλους ζωής (ISO 15686-5, 2017).

Η κοινωνική διάσταση της LCSA παραμένει λιγότερο ανεπτυγμένη συγκριτικά με τις περιβαλλοντικές και οικονομικές αξιολογήσεις. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια αυξάνεται το ερευνητικό ενδιαφέρον σχετικά με την ενσωμάτωση κοινωνικών δεικτών που σχετίζονται με την υγεία, την ασφάλεια, την ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, την προσβασιμότητα και την ευημερία των χρηστών των κατοικιών (UNEP, 2020).

Στον κτιριακό τομέα, η εφαρμογή της LCSA χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για τη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικών και βιοκλιματικών κατοικιών, επιτρέποντας την ολοκληρωμένη αποτίμηση της βιωσιμότητας διαφορετικών σχεδιαστικών και κατασκευαστικών επιλογών. Η προσέγγιση αυτή καθιστά δυνατή τη λήψη αποφάσεων που δεν βασίζονται αποκλειστικά στο οικονομικό ή περιβαλλοντικό κόστος, αλλά λαμβάνουν υπόψη και ευρύτερες κοινωνικές παραμέτρους.

Παράλληλα, η ενσωμάτωση της Dynamic LCA στο πλαίσιο της LCSA επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων των κατοικιών. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει σημαντικά την αξιοπιστία και τη ρεαλιστικότητα των αξιολογήσεων βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα (Slavkovic & Stephan, 2025).

2.9.1 Περιβαλλοντικοί δείκτες

Οι περιβαλλοντικοί δείκτες αποτελούν τη βασικότερη και περισσότερο ανεπτυγμένη διάσταση της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής στον κτιριακό τομέα. Μέσω των δεικτών αυτών καθίσταται δυνατή η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και το τέλος ζωής των κατοικιών (Asdrubali et al., 2024).

Ο πλέον διαδεδομένος περιβαλλοντικός δείκτης στις μελέτες κτιριακής βιωσιμότητας είναι το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential – GWP), το οποίο εκφράζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-eq). Ο συγκεκριμένος δείκτης χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της συμβολής των κατοικιών στην κλιματική αλλαγή και αποτελεί βασικό στοιχείο συγκριτικών αξιολογήσεων μεταξύ συμβατικών και βιοκλιματικών κατοικιών (Su et al., 2021).

Εκτός από το GWP, ιδιαίτερα σημαντικοί θεωρούνται και άλλοι περιβαλλοντικοί δείκτες, όπως η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, η χρήση φυσικών πόρων, η κατανάλωση νερού, η οξίνιση, ο ευτροφισμός και οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η αξιολόγηση πολλαπλών περιβαλλοντικών κατηγοριών επιτρέπει την ολοκληρωμένη αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων των κατοικιών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους (ISO 14044, 2006).

Στον κτιριακό τομέα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις διακρίνονται συνήθως σε ενσωματωμένες επιπτώσεις (embodied impacts), που σχετίζονται με τα δομικά υλικά και τη διαδικασία κατασκευής, και σε λειτουργικές επιπτώσεις (operational impacts), οι οποίες συνδέονται με την κατανάλωση ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας του κτιρίου. Στις συμβατικές κατοικίες, η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας συχνά αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, ενώ στις βιοκλιματικές κατοικίες αυξάνεται η σχετική σημασία των ενσωματωμένων εκπομπών λόγω της χρήσης αποδοτικότερων υλικών και τεχνολογιών (Asdrubali et al., 2024).

Η εφαρμογή της Dynamic LCA στο πλαίσιο της LCSA επιτρέπει την ακριβέστερη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών δεικτών, καθώς ενσωματώνει χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, όπως η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος και οι μελλοντικές μεταβολές των εκπομπών άνθρακα. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τη δυναμική προσέγγιση ιδιαίτερα

σημαντική για τη μακροχρόνια περιβαλλοντική αξιολόγηση των κατοικιών και την ανάπτυξη στρατηγικών βιώσιμης δόμησης (Slavkovic & Stephan, 2025).

2.9.2 Οικονομικοί δείκτες

Οι οικονομικοί δείκτες αποτελούν βασική διάσταση της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής, καθώς επιτρέπουν την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας των κατοικιών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Στον κτιριακό τομέα, η οικονομική αξιολόγηση δεν περιορίζεται μόνο στο αρχικό κόστος κατασκευής, αλλά περιλαμβάνει επίσης το λειτουργικό κόστος, το κόστος συντήρησης, αντικατάστασης και το κόστος τέλους ζωής των κτιρίων (Fuller & Petersen, 1996).

Ο βασικότερος οικονομικός δείκτης που χρησιμοποιείται στις μελέτες LCSA είναι το Κόστος Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost – LCC), το οποίο εκφράζει το συνολικό οικονομικό κόστος μιας κατοικίας σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα. Η ανάλυση αυτή βασίζεται συνήθως σε τεχνικές προεξόφλησης χρηματοροών, επιτρέποντας τη μετατροπή μελλοντικών δαπανών σε παρούσες αξίες μέσω κατάλληλου προεξοφλητικού επιτοκίου (ISO 15686-5, 2017).

Εκτός από το συνολικό κόστος κύκλου ζωής, χρησιμοποιούνται συχνά και άλλοι οικονομικοί δείκτες, όπως η καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value – NPV), η περίοδος αποπληρωμής (Payback Period) και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR), ιδιαίτερα σε μελέτες ενεργειακών αναβαθμίσεων και εφαρμογής τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας (Asdrubali et al., 2024).

Στις βιοκλιματικές κατοικίες, το αρχικό κατασκευαστικό κόστος είναι συνήθως υψηλότερο σε σχέση με τις συμβατικές κατοικίες λόγω της χρήσης αποδοτικότερων υλικών, τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας και βελτιωμένων συστημάτων θερμομόνωσης. Ωστόσο, η μειωμένη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας και οι χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους κύκλου ζωής σε μακροχρόνιο ορίζοντα (Santamouris, 2016).

Η εφαρμογή της Dynamic LCA στο πλαίσιο της LCSA επιτρέπει επίσης την ακριβέστερη αποτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων των κατοικιών, καθώς καθίσταται δυνατή η ενσωμάτωση μελλοντικών μεταβολών που σχετίζονται με το ενεργειακό κόστος, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις πολιτικές ενεργειακής μετάβασης. Η δυνατότητα αυτή

ενισχύει σημαντικά τη ρεαλιστικότητα των οικονομικών αξιολογήσεων και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή βιώσιμων κατασκευαστικών λύσεων (Slavkovic & Stephan, 2025).

Η αξιολόγηση οικονομικών δεικτών θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη βιώσιμων κατοικιών, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών σχεδιαστικών και τεχνολογικών επιλογών όχι μόνο με περιβαλλοντικά αλλά και με οικονομικά κριτήρια. Με τον τρόπο αυτό, η LCSA συμβάλλει στην επιλογή λύσεων που παρουσιάζουν συνολικά βελτιωμένη βιωσιμότητα σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των κατοικιών.

2.9.3 Κοινωνικοί δείκτες

Οι κοινωνικοί δείκτες αποτελούν τη λιγότερο ανεπτυγμένη αλλά ιδιαίτερα σημαντική διάσταση της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής στον κτιριακό τομέα. Η κοινωνική αξιολόγηση εξετάζει τις επιπτώσεις που έχουν οι κατοικίες και οι κατασκευαστικές δραστηριότητες στην υγεία, την ασφάλεια, την ποιότητα ζωής και τη συνολική ευημερία των χρηστών και της κοινωνίας (UNEP, 2020).

Σε αντίθεση με τους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς δείκτες, οι κοινωνικοί δείκτες παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα ως προς την ποσοτικοποίησή τους, καθώς συχνά συνδέονται με ποιοτικά χαρακτηριστικά και υποκειμενικές αξιολογήσεις. Παρά ταύτα, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση κοινωνικών παραμέτρων στις μελέτες βιωσιμότητας κατοικιών (Asdrubali et al., 2024).

Μεταξύ των σημαντικότερων κοινωνικών δεικτών στον κτιριακό τομέα περιλαμβάνονται η ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, η θερμική άνεση, η ποιότητα αέρα, η ακουστική άνεση, η ασφάλεια, η προσβασιμότητα και η συνολική ποιότητα διαβίωσης των χρηστών. Ιδιαίτερα στις βιοκλιματικές κατοικίες, η αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών σχεδιασμού μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση των συνθηκών άνεσης και ευημερίας των κατοίκων (Santamouris, 2016).

Παράλληλα, οι κοινωνικοί δείκτες συνδέονται και με ευρύτερες παραμέτρους βιωσιμότητας, όπως η ενεργειακή φτώχεια, η οικονομική προσβασιμότητα των κατοικιών και η ανθεκτικότητα των κτιρίων απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η αξιολόγηση των παραμέτρων αυτών θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη διαμόρφωση στρατηγικών βιώσιμης και κοινωνικά δίκαιης δόμησης (UNEP, 2020).

Η εφαρμογή της Dynamic LCA στο πλαίσιο της LCSA μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αξιολόγηση κοινωνικών επιπτώσεων, καθώς επιτρέπει τη συνεκτίμηση μελλοντικών μεταβολών που σχετίζονται με τις ενεργειακές συνθήκες, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις πολιτικές βιώσιμης ανάπτυξης. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στην ανάπτυξη περισσότερο ολοκληρωμένων και ρεαλιστικών μοντέλων αξιολόγησης βιωσιμότητας των κατοικιών (Slavkovic & Stephan, 2025).

Παρά την αυξανόμενη ανάπτυξη της κοινωνικής διάστασης της LCSA, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί που σχετίζονται με την έλλειψη τυποποιημένων μεθόδων αξιολόγησης και τη δυσκολία ποσοτικοποίησης κοινωνικών παραμέτρων. Ωστόσο, η ενσωμάτωση κοινωνικών δεικτών θεωρείται απαραίτητη για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της βιωσιμότητας των κατοικιών και για την ανάπτυξη στρατηγικών βιώσιμης δόμησης με επίκεντρο τον άνθρωπο.

2.10 Ερευνητικά κενά και μελλοντικές κατευθύνσεις

Παρά τη σημαντική ανάπτυξη των μεθοδολογιών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής στον κτιριακό τομέα, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά ερευνητικά κενά και περιορισμοί που σχετίζονται με την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των κατοικιών. Τα τελευταία χρόνια, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί κυρίως προς την ανάπτυξη δυναμικών και ολοκληρωμένων προσεγγίσεων αξιολόγησης που ενσωματώνουν τη χρονική διάσταση, τις κοινωνικές παραμέτρους και τις τεχνολογικές εξελίξεις (Slavkovic & Stephan, 2025).

Ένα από τα σημαντικότερα ερευνητικά κενά αφορά την περιορισμένη ενσωμάτωση της χρονικής διάστασης στις συμβατικές μελέτες LCA. Η πλειονότητα των υφιστάμενων μελετών εξακολουθεί να βασίζεται σε στατικές παραδοχές και σταθερούς συντελεστές εκπομπών, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη μελλοντική εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, την απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής και τις τεχνολογικές μεταβολές στον ενεργειακό τομέα (Su et al., 2021).

Παράλληλα, σημαντικοί περιορισμοί εντοπίζονται και στην εφαρμογή της LCSA, ιδιαίτερα ως προς την κοινωνική διάσταση της βιωσιμότητας. Παρότι οι περιβαλλοντικοί και οικονομικοί δείκτες παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο ανάπτυξης και τυποποίησης, οι

κοινωνικοί δείκτες παραμένουν περιορισμένοι και συχνά βασίζονται σε ποιοτικές ή μη τυποποιημένες προσεγγίσεις αξιολόγησης (UNEP, 2020).

Επιπλέον, η έλλειψη ολοκληρωμένων δυναμικών βάσεων δεδομένων και αξιόπιστων σεναρίων ενεργειακής μετάβασης περιορίζει τη δυνατότητα ευρύτερης εφαρμογής της Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα. Η ανάγκη ανάπτυξης περισσότερο αξιόπιστων μοντέλων πρόβλεψης και δυναμικών συντελεστών εκπομπών αποτελεί βασικό αντικείμενο σύγχρονης έρευνας (Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως το BIM, η Τεχνητή Νοημοσύνη και τα Ψηφιακά Δίδυμα, στις διαδικασίες περιβαλλοντικής αξιολόγησης. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην αυτοματοποίηση των διαδικασιών απογραφής, στη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων και στη δυναμική παρακολούθηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των κατοικιών (Boje et al., 2020).

Παράλληλα, αυξάνεται συνεχώς το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη κυκλικών μοντέλων αξιολόγησης βιωσιμότητας, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης υλικών, την ανακύκλωση και τη μείωση των αποβλήτων στον κατασκευαστικό τομέα. Η σύνδεση της Dynamic LCA με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας θεωρείται μία από τις σημαντικότερες μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας στον κτιριακό τομέα (Asdrubali et al., 2024).

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει την ανάγκη ανάπτυξης περισσότερο ολοκληρωμένων, δυναμικών και ψηφιακά υποστηριζόμενων μεθοδολογιών αξιολόγησης βιωσιμότητας για τις κατοικίες. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει προς αυτή την κατεύθυνση μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα με χρήση Dynamic LCA και LCSA, ενσωματώνοντας τη χρονική διάσταση και τις σύγχρονες απαιτήσεις βιώσιμης δόμησης.

2.11 Συνοπτική παρουσίαση βιβλιογραφίας

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε τη σημαντική ανάπτυξη των μεθοδολογιών αξιολόγησης βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα, με ιδιαίτερη έμφαση στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), στη Δυναμική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Dynamic LCA), στην Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) και στην Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής

(LCSA). Οι περισσότερες σύγχρονες μελέτες επικεντρώνονται στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατοικιών μέσω βιώσιμων και βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού.

Ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της Dynamic LCA, η οποία ενσωματώνει τη χρονική διάσταση στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων και επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση της εξέλιξης των εκπομπών και του ενεργειακού μίγματος σε βάθος χρόνου. Παράλληλα, αυξάνεται συνεχώς η ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως το BIM, η Τεχνητή Νοημοσύνη και τα Ψηφιακά Δίδυμα, στις διαδικασίες αξιολόγησης βιωσιμότητας.

Πίνακας 1 Σύνοψη βασικών ερευνητικών μελετών

Συγγραφέας	Έτος	Αντικείμενο	Μεθοδολογία	Βασικά ευρήματα
Finnveden et al.	2009	Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)	Review	Εξέλιξη και ανάπτυξη της μεθοδολογίας LCA
Slavkovic & Stephan	2025	Dynamic LCA	Simulation	Ενσωμάτωση χρονικής διάστασης στην αξιολόγηση κτιρίων
Fuller & Petersen	1996	Life Cycle Cost (LCC)	Economic methodology	Υπολογισμός κόστους κύκλου ζωής και προεξόφληση
Klöppfer	2008	LCSA	Conceptual framework	Ενοποίηση περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών διαστάσεων
Asdrubali et al.	2024	LCA κτιρίων	Bibliometric analysis	Ανάπτυξη της LCA σε ενεργειακά αποδοτικά κτίρια
Givoni	1994	Βιοκλιματικός σχεδιασμός	Theoretical approach	Παθητικές στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας
Olgyay	1963	Bioclimatic architecture	Architectural approach	Προσαρμογή κτιρίων στις

				κλιματικές συνθήκες
Santamouris	2016	Ενεργειακή απόδοση κτιρίων	Review	Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης και cooling strategies
International Organization for Standardization	2006	LCA framework	Standard	Καθορισμός βασικών σταδίων της LCA
United Nations Environment Programme	2011	LCSA	Framework	Ενοποίηση περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής αξιολόγησης
Boje et al.	2020	Digital Twins	Review	Εφαρμογή ψηφιακών διδύμων στον κτιριακό τομέα
Soust-Verdaguer et al.	2017	BIM και LCA	BIM-based assessment	Διασύνδεση BIM και περιβαλλοντικής αξιολόγησης

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1, η διεθνής βιβλιογραφία εστιάζει κυρίως στην ανάπτυξη και εφαρμογή μεθοδολογιών αξιολόγησης βιωσιμότητας των κατοικιών, με ιδιαίτερη έμφαση στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους.

Πίνακας 2 Βασικές διαφορές μεταξύ static LCA και Dynamic LCA

Παράμετρος	Static LCA	Dynamic LCA
Συντελεστές εκπομπών	Σταθεροί	Χρονικά μεταβαλλόμενοι
Ενεργειακό μίγμα	Στατικό	Δυναμικό
Χρονική διάσταση	Δεν ενσωματώνεται	Ενσωματώνεται
Μακροχρόνια αξιολόγηση	Περιορισμένη	Πιο ρεαλιστική
Ακρίβεια αποτελεσμάτων	Μέτρια	Αυξημένη
Πολυπλοκότητα	Χαμηλότερη	Υψηλότερη

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις βασικές διαφοροποιήσεις μεταξύ της συμβατικής static LCA και της Dynamic LCA. Η δυναμική προσέγγιση επιτρέπει την ενσωμάτωση χρονικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων και την ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατοικιών σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα.

Πίνακας 3 Βασικές διαστάσεις της LCSA στον κτιριακό τομέα

Διάσταση	Βασικοί δείκτες
Περιβαλλοντική	GWP, κατανάλωση ενέργειας, κατανάλωση νερού, εκπομπές CO ₂
Οικονομική	LCC, NPV, IRR, λειτουργικό κόστος
Κοινωνική	Θερμική άνεση, ποιότητα αέρα, ασφάλεια, ποιότητα ζωής

Η Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA) βασίζεται στη συνδυασμένη αξιολόγηση περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3, η μεθοδολογία επιτρέπει την ολοκληρωμένη αποτίμηση της βιωσιμότητας των κατοικιών και τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών και κατασκευαστικών επιλογών.

Πίνακας 4 Βασικά ερευνητικά κενά της διεθνούς βιβλιογραφίας

Πεδίο	Ερευνητικά κενά
Dynamic LCA	Περιορισμένες δυναμικές βάσεις δεδομένων
LCSA	Περιορισμένη ανάπτυξη κοινωνικών δεικτών
Κτιριακός τομέας	Έλλειψη ολοκληρωμένων δυναμικών μοντέλων
Ψηφιακές τεχνολογίες	Περιορισμένη διαλειτουργικότητα BIM και LCA

Κυκλική οικονομία	Περιορισμένη ενσωμάτωση reuse/recycling σε Dynamic LCA
-------------------	---

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα σημαντικότερα ερευνητικά κενά που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τη Dynamic LCA και τη LCSA στον κτιριακό τομέα. Τα βασικότερα προβλήματα σχετίζονται με την έλλειψη δυναμικών βάσεων δεδομένων, τη δυσκολία ανάπτυξης κοινωνικών δεικτών και την περιορισμένη ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών και αρχών κυκλικής οικονομίας στις διαδικασίες αξιολόγησης βιωσιμότητας.

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει τη μετάβαση από τις συμβατικές στατικές προσεγγίσεις προς περισσότερο δυναμικές και ολοκληρωμένες μεθοδολογίες αξιολόγησης βιωσιμότητας. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει προς αυτή την κατεύθυνση μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα με χρήση Dynamic LCA και LCSA.

3. Μεθοδολογία

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα με χρήση Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Assessment – Dynamic LCA) και Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA).

Η μεθοδολογική προσέγγιση της έρευνας βασίζεται στη συνδυασμένη εφαρμογή περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών εργαλείων αξιολόγησης, με στόχο την ολοκληρωμένη αποτίμηση της βιωσιμότητας των δύο τύπων κατοικιών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω της Dynamic LCA, η οικονομική αξιολόγηση μέσω της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost – LCC), ενώ η συνολική αξιολόγηση βιωσιμότητας βασίζεται στο πλαίσιο της LCSA (Klöppfer, 2008· UNEP, 2011).

Η έρευνα επικεντρώνεται στη συγκριτική αξιολόγηση μίας συμβατικής και μίας βιοκλιματικής κατοικίας ίδιων βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών, εξετάζοντας τις περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις τους σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών. Στο πλαίσιο της ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη τόσο οι ενσωματωμένες επιπτώσεις που σχετίζονται με τα δομικά υλικά και τη διαδικασία κατασκευής όσο και οι λειτουργικές επιπτώσεις που συνδέονται με την κατανάλωση ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας των κατοικιών (ISO 14040, 2006· ISO 14044, 2006).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ενσωμάτωση της χρονικής διάστασης μέσω της Dynamic LCA, καθώς η περιβαλλοντική επίδοση των κατοικιών επηρεάζεται σημαντικά από τη μελλοντική εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, τη σταδιακή απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής και τις τεχνολογικές μεταβολές στον ενεργειακό τομέα. Η δυναμική προσέγγιση επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατοικιών συγκριτικά με τις συμβατικές static LCA προσεγγίσεις (Slavkovic & Stephan, 2025).

Για τις ανάγκες της έρευνας χρησιμοποιούνται δεδομένα που βασίζονται στον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK), σε διεθνή βιβλιογραφικά δεδομένα και σε στοιχεία της ελληνικής αγοράς σχετικά με τα δομικά υλικά, το κόστος κατασκευής και την

ενεργειακή κατανάλωση κατοικιών. Παράλληλα, αξιοποιούνται μελλοντικά σενάρια ενεργειακής μετάβασης και χρονικά μεταβαλλόμενοι συντελεστές εκπομπών για την εφαρμογή της Dynamic LCA (Su et al., 2021).

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά οι κατοικίες μελέτης, τα όρια του συστήματος, η λειτουργική μονάδα, οι μεθοδολογίες αξιολόγησης και οι βασικές παραδοχές της έρευνας.

3.2 Περιγραφή των κατοικιών μελέτης

Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας επιλέχθηκε η συγκριτική αξιολόγηση δύο κατοικιών ίδιων βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών: μίας συμβατικής κατοικίας και μίας βιοκλιματικής κατοικίας. Η επιλογή κατοικιών με παρόμοια γεωμετρία και λειτουργική χρήση πραγματοποιήθηκε ώστε η σύγκριση να βασίζεται κυρίως στις διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με τον σχεδιασμό, τα υλικά, την ενεργειακή απόδοση και τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση των κτιρίων.

Και οι δύο κατοικίες θεωρείται ότι βρίσκονται στην Ελλάδα και εξετάζονται σε χρονικό ορίζοντα ζωής 50 ετών, σύμφωνα με συνήθεις παραδοχές μελετών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στον κτιριακό τομέα (ISO 14040, 2006· ISO 14044, 2006). Η λειτουργική μονάδα της έρευνας βασίζεται στη σύγκριση κατοικιών ίδιου εμβαδού και παρόμοιας χρήσης, ώστε να διασφαλίζεται η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Η συμβατική κατοικία αντιπροσωπεύει μία τυπική ελληνική κατοικία χωρίς εκτεταμένη εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών και προηγμένων τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας. Αντίθετα, η βιοκλιματική κατοικία σχεδιάζεται με στόχο τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης μέσω παθητικών στρατηγικών σχεδιασμού, βελτιωμένης θερμομόνωσης και αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Givoni, 1994· Olgyay, 1963).

Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο κατοικιών πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής Dynamic LCA και LCSA, εξετάζοντας τόσο τις ενσωματωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τα δομικά υλικά και τη διαδικασία κατασκευής όσο και τις λειτουργικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων (Slavkovic & Stephan, 2025).

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη.

3.2.1 Συμβατική κατοικία

Η συμβατική κατοικία της παρούσας μελέτης αντιπροσωπεύει μία τυπική ελληνική κατοικία σύγχρονης κατασκευής χωρίς εκτεταμένη εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού και προηγμένων τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας. Η κατοικία θεωρείται ότι κατασκευάζεται σύμφωνα με τις συνήθεις κατασκευαστικές πρακτικές και τα βασικά πρότυπα ενεργειακής απόδοσης που εφαρμόζονται στον ελληνικό κτιριακό τομέα.

Για λόγους συγκρισιμότητας με τη βιοκλιματική κατοικία, θεωρείται ότι η συμβατική κατοικία διαθέτει συνολική επιφάνεια 120 m² και διάρκεια ζωής 50 ετών. Η λειτουργία της κατοικίας περιλαμβάνει συνήθεις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, αερισμό και χρήση ηλεκτρικών συσκευών, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού ελληνικού νοικοκυριού.

Η κατασκευή της συμβατικής κατοικίας βασίζεται κυρίως σε συμβατικά δομικά υλικά, όπως οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιίες συμβατικής θερμομονωτικής ικανότητας και συνήθη κουφώματα αλουμινίου χωρίς προηγμένα συστήματα ενεργειακής απόδοσης. Παράλληλα, θεωρείται περιορισμένη η αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών σχεδιασμού, όπως ο φυσικός σκιασμός, ο βιοκλιματικός προσανατολισμός και ο φυσικός αερισμός (Olgyay, 1963).

Η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας της συμβατικής κατοικίας θεωρείται υψηλότερη συγκριτικά με τη βιοκλιματική κατοικία, λόγω των αυξημένων αναγκών θέρμανσης και ψύξης και της χαμηλότερης συνολικής ενεργειακής απόδοσης του κελύφους. Για τις ανάγκες της έρευνας θεωρείται ετήσια κατανάλωση ενέργειας 140 kWh/m², τιμή η οποία βασίζεται σε δεδομένα του KENAK και σε αντίστοιχες βιβλιογραφικές μελέτες σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση κατοικιών στην Ελλάδα (Santamouris, 2016).

Το αρχικό κόστος κατασκευής της συμβατικής κατοικίας εκτιμάται σε 1.700 €/m², ενώ λαμβάνονται υπόψη επίσης το λειτουργικό κόστος ενέργειας, οι δαπάνες συντήρησης και οι πιθανές αντικαταστάσεις δομικών και ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της

Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) και της συνολικής αξιολόγησης βιωσιμότητας μέσω της LCSA.

Η συμβατική κατοικία χρησιμοποιείται ως βασικό σενάριο αναφοράς για τη συγκριτική αξιολόγηση με τη βιοκλιματική κατοικία, με στόχο την αποτίμηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών οφελών που μπορούν να προκύψουν από την εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού και ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών.

3.2.2 Βιοκλιματική κατοικία

Η βιοκλιματική κατοικία της παρούσας μελέτης σχεδιάζεται με στόχο τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της. Ο σχεδιασμός της βασίζεται σε αρχές βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής και βιώσιμης δόμησης, αξιοποιώντας παθητικές στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας και τεχνολογίες υψηλής ενεργειακής απόδοσης (Givoni, 1994· Olgyay, 1963).

Για λόγους συγκρισιμότητας με τη συμβατική κατοικία, θεωρείται ότι η βιοκλιματική κατοικία διαθέτει συνολική επιφάνεια 120 m² και διάρκεια ζωής 50 ετών. Η λειτουργική χρήση της κατοικίας είναι παρόμοια με εκείνη της συμβατικής κατοικίας, ώστε οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων να οφείλονται κυρίως στις στρατηγικές σχεδιασμού και στις τεχνολογίες ενεργειακής απόδοσης που εφαρμόζονται.

Η βιοκλιματική κατοικία χαρακτηρίζεται από βελτιωμένο θερμικό κέλυφος, αυξημένη θερμομονωτική ικανότητα, ενεργειακά αποδοτικά κουφώματα και αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών σχεδιασμού, όπως ο σωστός προσανατολισμός, ο φυσικός φωτισμός, ο φυσικός αερισμός και τα συστήματα σκιασμού. Παράλληλα, εξετάζεται η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποδοτικότερων ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων για τη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας (Santamouris, 2016).

Η εφαρμογή των παραπάνω στρατηγικών οδηγεί σε σημαντικά μειωμένη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με τη συμβατική κατοικία. Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας θεωρείται ετήσια κατανάλωση ενέργειας 85 kWh/m², σύμφωνα με δεδομένα ενεργειακά αποδοτικών κατοικιών και αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με βιοκλιματικά κτίρια (Asdrubali et al., 2024).

Το αρχικό κόστος κατασκευής της βιοκλιματικής κατοικίας θεωρείται υψηλότερο συγκριτικά με τη συμβατική κατοικία λόγω της χρήσης αποδοτικότερων υλικών,

τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας και βελτιωμένων συστημάτων θερμομόνωσης. Για τις ανάγκες της ανάλυσης θεωρείται κόστος κατασκευής 2.000 €/m². Ωστόσο, η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και οι χαμηλότερες απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης εκτιμάται ότι μπορούν να οδηγήσουν σε χαμηλότερο συνολικό κόστος κύκλου ζωής σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα (Fuller & Petersen, 1996).

Η βιοκλιματική κατοικία αξιολογείται μέσω της εφαρμογής Dynamic LCA και LCSA με στόχο τη διερεύνηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών οφελών που προκύπτουν από τη χρήση βιώσιμων στρατηγικών σχεδιασμού στον ελληνικό κτιριακό τομέα. Η συγκριτική αξιολόγηση με τη συμβατική κατοικία επιτρέπει την αποτίμηση της συνολικής βιωσιμότητας των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων κατοικίας σε βάθος χρόνου.

Πίνακας 5 Σύγκριση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας

Χαρακτηριστικό	Συμβατική Κατοικία	Βιοκλιματική Κατοικία
Επιφάνεια	120 m ²	120 m ²
Διάρκεια ζωής	50 έτη	50 έτη
Σχεδιασμός	Τυπικός, χωρίς βιοκλιματικές αρχές	Βιοκλιματικός σχεδιασμός
Προσανατολισμός	Μη βελτιστοποιημένος	Βέλτιστος προσανατολισμός
Θερμομόνωση	Βασική	Ενισχυμένη
Κουφώματα	Τυπικά	Ενεργειακά αποδοτικά
Φυσικός αερισμός	Περιορισμένος	Εκτεταμένος
Εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας	Περιορισμένη	Υψηλή
Σύστημα θέρμανσης	Λέβητας (πετρέλαιο/αέριο)	Αντλία θερμότητας
Σύστημα ψύξης	Κλιματιστικά	Υψηλής απόδοσης συστήματα
ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά)	Όχι	Ναι

Κατανάλωση ενέργειας	Υψηλή	Χαμηλή
Εκπομπές CO ₂	Αυξημένες	Μειωμένες
Αρχικό κόστος	Χαμηλότερο	Υψηλότερο
Λειτουργικό κόστος	Υψηλό	Χαμηλό
Συνολικό κόστος κύκλου ζωής	Αυξημένο	Μειωμένο
Θερμική άνεση	Μέτρια	Υψηλή
Περιβαλλοντική απόδοση	Χαμηλή	Υψηλή

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5, η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την ενεργειακή απόδοση, την περιβαλλοντική συμπεριφορά και τη συνολική βιωσιμότητα σε σύγκριση με τη συμβατική κατοικία, παρά το αυξημένο αρχικό κόστος κατασκευής της (Asdrubali et al., 2024; Santamouris, 2016).

3.3 Λειτουργική μονάδα και χρονικός ορίζοντας

Η επιλογή κατάλληλης λειτουργικής μονάδας αποτελεί βασικό στοιχείο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, καθώς διασφαλίζει τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και σεναρίων αξιολόγησης (ISO 14040, 2006). Στην παρούσα έρευνα, η λειτουργική μονάδα ορίζεται ως μία κατοικία συνολικής επιφάνειας 120 m² με διάρκεια ζωής 50 ετών, η οποία καλύπτει τις ίδιες λειτουργικές και ενεργειακές ανάγκες χρήσης.

Η επιλογή κοινής λειτουργικής μονάδας για τη συμβατική και τη βιοκλιματική κατοικία πραγματοποιήθηκε ώστε η συγκριτική αξιολόγηση να βασίζεται αποκλειστικά στις διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με τον σχεδιασμό, τα δομικά υλικά, την ενεργειακή απόδοση και τις τεχνολογίες που εφαρμόζονται στα δύο κτίρια. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η αντικειμενικότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της έρευνας.

Ο χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης ορίζεται στα 50 έτη, σύμφωνα με συνήθεις παραδοχές μελετών LCA και LCC στον κτιριακό τομέα (ISO 15686-5, 2017). Η επιλογή μακροχρόνιου

χρονικού ορίζοντα θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι κατοικίες αποτελούν κατασκευές μεγάλης διάρκειας ζωής, στις οποίες οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους.

Στο πλαίσιο της Dynamic LCA, ο χρονικός ορίζοντας των 50 ετών επιτρέπει την ενσωμάτωση μεταβολών που σχετίζονται με την εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, τη σταδιακή απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής και τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ενέργειας. Η δυναμική αυτή προσέγγιση οδηγεί σε περισσότερο ρεαλιστική αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατοικιών συγκριτικά με τις συμβατικές static LCA προσεγγίσεις (Slavkovic & Stephan, 2025).

Παράλληλα, ο χρονικός ορίζοντας των 50 ετών επιτρέπει την αξιολόγηση των λειτουργικών δαπανών, των αναγκών συντήρησης και των πιθανών αντικαταστάσεων δομικών και ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων μέσω της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC). Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ολοκληρωμένη οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση των δύο κατοικιών σε μακροχρόνιο επίπεδο.

Η επιλογή της συγκεκριμένης λειτουργικής μονάδας και του χρονικού ορίζοντα θεωρείται κατάλληλη για τη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα, καθώς επιτρέπει την ολοκληρωμένη αποτίμηση της βιωσιμότητας των δύο τύπων κατοικιών μέσω της εφαρμογής Dynamic LCA και LCSA.

3.4 Όρια συστήματος

Ο καθορισμός των ορίων του συστήματος αποτελεί βασικό στάδιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, καθώς προσδιορίζει τις διεργασίες και τις φάσεις του κύκλου ζωής που περιλαμβάνονται στην αξιολόγηση (ISO 14040, 2006). Στην παρούσα έρευνα, τα όρια του συστήματος ορίζονται σύμφωνα με την προσέγγιση «από την παραγωγή έως το τέλος ζωής» (cradle-to-grave), ώστε να επιτευχθεί ολοκληρωμένη αποτίμηση των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων των κατοικιών.

Η ανάλυση περιλαμβάνει όλα τα βασικά στάδια του κύκλου ζωής των κατοικιών, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής και μεταφοράς των δομικών υλικών, της κατασκευής, της λειτουργίας, της συντήρησης, των πιθανών αντικαταστάσεων και του τέλους ζωής των κτιρίων. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την

ολοκληρωμένη αξιολόγηση βιωσιμότητας των κατοικιών μέσω της εφαρμογής Dynamic LCA και LCSA (ISO 14044, 2006).

Στο στάδιο παραγωγής περιλαμβάνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την εξόρυξη πρώτων υλών, την παραγωγή δομικών υλικών και τη μεταφορά τους στο εργοτάξιο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα βασικά δομικά υλικά των κατοικιών, όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας, τα θερμομονωτικά υλικά και τα κουφώματα, καθώς τα υλικά αυτά συμβάλλουν σημαντικά στις ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα των κτιρίων (Asdrubali et al., 2024).

Η φάση λειτουργίας περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, αερισμό και λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών. Στην παρούσα έρευνα, η λειτουργική φάση αξιολογείται μέσω Dynamic LCA, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική μεταβολή του ενεργειακού μίγματος και των συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας (Slavkovic & Stephan, 2025).

Παράλληλα, στα όρια του συστήματος περιλαμβάνονται οι εργασίες συντήρησης και αντικατάστασης δομικών και ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών. Οι διαδικασίες αυτές επηρεάζουν τόσο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο και το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των κτιρίων.

Το στάδιο τέλους ζωής περιλαμβάνει τη διαχείριση των αποβλήτων κατεδάφισης, τη μεταφορά των υλικών και τις διαδικασίες τελικής διάθεσης ή ανακύκλωσης. Παρότι το στάδιο αυτό παρουσιάζει συνήθως μικρότερη συμβολή συγκριτικά με τη φάση λειτουργίας, θεωρείται σημαντικό για την ολοκληρωμένη αποτίμηση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατοικιών.

Η επιλογή ορίων συστήματος cradle-to-grave επιτρέπει την ολοκληρωμένη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα, παρέχοντας συνολική εικόνα των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων των δύο τύπων κατοικιών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους.

3.5 Μεθοδολογία Dynamic LCA

Η Δυναμική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Assessment – Dynamic LCA) αποτελεί εξέλιξη της συμβατικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, ενσωματώνοντας τη χρονική διάσταση στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συστημάτων. Σε

αντίθεση με τη static LCA, η οποία βασίζεται σε σταθερούς συντελεστές εκπομπών και στατικά δεδομένα, η Dynamic LCA λαμβάνει υπόψη χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, όπως η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, οι τεχνολογικές μεταβολές και η σταδιακή απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020· Slavkovic & Stephan, 2025).

Στην παρούσα έρευνα, η Dynamic LCA εφαρμόζεται για τη συγκριτική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατοικιών κατά τη διάρκεια ζωής τους, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική εξέλιξη των εκπομπών που σχετίζονται κυρίως με τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας.

Η ανάλυση βασίζεται στις βασικές αρχές των προτύπων ISO 14040 και ISO 14044 σχετικά με την Ανάλυση Κύκλου Ζωής, προσαρμοσμένες όμως στη δυναμική προσέγγιση της περιβαλλοντικής αξιολόγησης (ISO 14040, 2006· ISO 14044, 2006). Στο πλαίσιο της Dynamic LCA εξετάζονται τόσο οι ενσωματωμένες επιπτώσεις που σχετίζονται με τα δομικά υλικά και τη διαδικασία κατασκευής όσο και οι λειτουργικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια λειτουργίας των κατοικιών.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη δυναμική αξιολόγηση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας, καθώς οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μεταβάλλονται σημαντικά σε βάθος χρόνου λόγω της εξέλιξης του ενεργειακού συστήματος. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται χρονικά μεταβαλλόμενοι συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι προσαρμόζονται σύμφωνα με σενάρια ενεργειακής μετάβασης και σταδιακής αύξησης της συμμετοχής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα (Su et al., 2021).

Παράλληλα, η Dynamic LCA επιτρέπει την ενσωμάτωση μελλοντικών τεχνολογικών εξελίξεων και πιθανών ενεργειακών αναβαθμίσεων των κατοικιών κατά τη διάρκεια ζωής τους. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στη δημιουργία περισσότερο ρεαλιστικών μοντέλων περιβαλλοντικής αξιολόγησης και ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων συγκριτικά με τις συμβατικές στατικές προσεγγίσεις.

Η εφαρμογή της Dynamic LCA στην παρούσα έρευνα πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών σταδίων απογραφής δεδομένων, υπολογισμού εκπομπών και αξιολόγησης

περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες υποενότητες.

3.5.1 Δυναμική Απογραφή Κύκλου Ζωής (Dynamic LCI)

Η απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory – LCI) αποτελεί βασικό στάδιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, καθώς περιλαμβάνει τη συλλογή και ποσοτικοποίηση όλων των εισροών και εκροών που σχετίζονται με το εξεταζόμενο σύστημα (ISO 14040, 2006). Στην περίπτωση της Dynamic LCA, η απογραφή δεδομένων πραγματοποιείται με δυναμικό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική εξέλιξη των παραμέτρων που επηρεάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κατοικιών.

Στην παρούσα έρευνα, το Dynamic Life Cycle Inventory (Dynamic LCI) περιλαμβάνει δεδομένα σχετικά με τα δομικά υλικά, την κατανάλωση ενέργειας, τις μεταφορές, τις εργασίες συντήρησης και τις πιθανές αντικαταστάσεις στοιχείων κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών. Η απογραφή πραγματοποιείται για ολόκληρο τον κύκλο ζωής των δύο κατοικιών και καλύπτει τόσο τις ενσωματωμένες όσο και τις λειτουργικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Για τη συμβατική και τη βιοκλιματική κατοικία καταγράφονται οι ποσότητες βασικών δομικών υλικών, όπως σκυρόδεμα, χάλυβας, θερμομονωτικά υλικά, κουφώματα και ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη οι ενεργειακές απαιτήσεις λειτουργίας των κατοικιών για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και χρήση ηλεκτρικών συσκευών, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά κάθε σεναρίου κατοικίας (Asdrubali et al., 2024).

Η δυναμική διάσταση της απογραφής ενσωματώνεται κυρίως μέσω της χρονικής μεταβολής των συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας και της εξέλιξης του ενεργειακού μίγματος κατά τη διάρκεια των 50 ετών λειτουργίας των κατοικιών. Με τον τρόπο αυτό, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατανάλωσης ενέργειας μεταβάλλονται δυναμικά σε βάθος χρόνου, επιτρέποντας ακριβέστερη αποτύπωση της πραγματικής περιβαλλοντικής επίδωσης των κτιρίων (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020).

Παράλληλα, στο πλαίσιο του Dynamic LCI λαμβάνονται υπόψη πιθανές αντικαταστάσεις δομικών και ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών, όπως συστήματα θέρμανσης και ψύξης, κουφώματα και λοιπά τεχνικά στοιχεία με περιορισμένο

χρόνο ζωής. Οι διαδικασίες αυτές επηρεάζουν τόσο τις ενσωματωμένες εκπομπές όσο και το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των κατοικιών.

Η εφαρμογή Dynamic LCI θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη περισσότερο ρεαλιστικών μοντέλων περιβαλλοντικής αξιολόγησης στον κτιριακό τομέα, καθώς επιτρέπει τη συνεκτίμηση χρονικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων που δεν μπορούν να αποτυπωθούν μέσω συμβατικών static LCA προσεγγίσεων (Slavkovic & Stephan, 2025).

3.5.2 Δυναμική Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Dynamic LCIA)

Η Δυναμική Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Impact Assessment – Dynamic LCIA) αποτελεί εξέλιξη της συμβατικής προσέγγισης LCIA, καθώς ενσωματώνει τη χρονική διάσταση στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στην παραδοσιακή στατική Ανάλυση Κύκλου Ζωής θεωρείται ότι οι συντελεστές εκπομπών και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του εξεταζόμενου συστήματος. Ωστόσο, στην πραγματικότητα οι παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές μεταβάλλονται διαχρονικά, ιδιαίτερα στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των συστημάτων ενέργειας (Levasseur et al., 2010; Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Η Dynamic LCIA αναπτύχθηκε με στόχο να αποτυπώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική χρονική κατανομή των εκπομπών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εκπομπές που πραγματοποιούνται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές δεν έχουν απαραίτητα την ίδια επίδραση στο περιβάλλον (Levasseur et al., 2010). Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για συστήματα με μεγάλο χρόνο ζωής, όπως τα κτίρια, όπου οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκτείνονται σε χρονικούς ορίζοντες αρκετών δεκαετιών (Asdrubali et al., 2024).

Στην παρούσα εργασία η δυναμική διάσταση της αξιολόγησης δεν εφαρμόζεται μέσω πλήρους δυναμικής μοντελοποίησης των συντελεστών χαρακτηρισμού, αλλά μέσω της χρονικής εξέλιξης του συντελεστή εκπομπών του ελληνικού ενεργειακού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το ενεργειακό μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής μεταβάλλεται συνεχώς λόγω της αυξανόμενης διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), της απόσυρσης λιγνιτικών μονάδων και της εφαρμογής πολιτικών αποανθρακοποίησης σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο (European Commission, 2019; IEA, 2023).

Για τον λόγο αυτό θεωρείται ότι ο συντελεστής εκπομπών του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου μειώνεται σταδιακά κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα των 50 ετών που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται υπόψη η αναμενόμενη βελτίωση του ενεργειακού συστήματος και επιτυγχάνεται ρεαλιστικότερη εκτίμηση των λειτουργικών εκπομπών των εξεταζόμενων κατοικιών (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020; Slavkovic & Stephan, 2025).

Η προσέγγιση αυτή διαφοροποιείται από μια συμβατική στατική LCA, όπου χρησιμοποιείται ένας σταθερός συντελεστής εκπομπών για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, ανεξάρτητα από τις μελλοντικές μεταβολές του ενεργειακού συστήματος. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της Dynamic LCIA επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (Levasseur et al., 2010; Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020).

Η πρακτική εφαρμογή της δυναμικής προσέγγισης στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μέσω της χρονικής μεταβολής του συντελεστή εκπομπών του ελληνικού ενεργειακού μίγματος, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 4.2.

3.5.3 Δυναμική εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής

Η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα. Στη συμβατική static LCA χρησιμοποιούνται συνήθως σταθεροί συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα της ανάλυσης. Ωστόσο, στην πραγματικότητα το ενεργειακό μίγμα μεταβάλλεται διαχρονικά λόγω της αυξανόμενης συμμετοχής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της μείωσης της χρήσης ορυκτών καυσίμων και της εφαρμογής πολιτικών απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα (Su et al., 2021).

Στην παρούσα έρευνα εφαρμόζεται δυναμική προσέγγιση του ενεργειακού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής, με στόχο την ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας των κατοικιών. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη σταδιακή μείωση των συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα των 50 ετών, σύμφωνα με σενάρια ενεργειακής μετάβασης και αύξησης της συμμετοχής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η δυναμική εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης, ιδιαίτερα στις κατοικίες με υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς αυξάνεται η συμμετοχή καθαρότερων μορφών ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με τη λειτουργία των κατοικιών μειώνονται σταδιακά σε βάθος χρόνου (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020).

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης θεωρείται ότι το ελληνικό ενεργειακό μίγμα ακολουθεί σταδιακή πορεία απανθρακοποίησης, σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές πολιτικές ενεργειακής μετάβασης και τους στόχους για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 (European Commission, 2020). Η παραδοχή αυτή επηρεάζει άμεσα τις λειτουργικές εκπομπές των κατοικιών και επιτρέπει περισσότερο ρεαλιστική αποτύπωση της μελλοντικής περιβαλλοντικής τους επίδοσης.

Η εφαρμογή dynamic electricity grid mix θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικών και βιοκλιματικών κατοικιών, καθώς επιτρέπει την αποτίμηση των πραγματικών περιβαλλοντικών οφελών που προκύπτουν από τη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και την αξιοποίηση αποδοτικότερων ενεργειακών τεχνολογιών.

Για την εφαρμογή της δυναμικής προσέγγισης στην παρούσα μελέτη υιοθετείται σενάριο σταδιακής απανθρακοποίησης του ελληνικού ενεργειακού μίγματος, σύμφωνα με τους στόχους του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ 2030) και τις προβλέψεις του International Energy Agency για την Ελλάδα (IEA, 2023). Ο αρχικός συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται σε 0,40 kg CO₂/kWh, τιμή που αντιστοιχεί στο ελληνικό ενεργειακό μίγμα της περιόδου αναφοράς και είναι συμβατή με δεδομένα του ENTSO-E για την Ελλάδα. Ο συντελεστής μειώνεται σταδιακά κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα των 50 ετών, φτάνοντας σε 0,08 kg CO₂/kWh στο έτος 50, σύμφωνα με το σενάριο επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 που προβλέπει η Ευρωπαϊκή Ένωση (European Commission, 2020). Η σταδιακή αυτή μείωση αντικατοπτρίζει την αναμενόμενη αύξηση της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο και την παράλληλη απόσυρση μονάδων παραγωγής υψηλών εκπομπών άνθρακα (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2020).

Η δυναμική προσέγγιση του ενεργειακού μίγματος συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη περισσότερο αξιόπιστων μοντέλων περιβαλλοντικής αξιολόγησης στον κτιριακό τομέα και

ενισχύει τη ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων της Dynamic LCA συγκριτικά με τις συμβατικές static LCA προσεγγίσεις (Slavkovic & Stephan, 2025).

3.6 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC)

Η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost – LCC) αποτελεί βασικό εργαλείο οικονομικής αξιολόγησης στον κτιριακό τομέα, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση του συνολικού κόστους ενός κτιρίου σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του. Η μεθοδολογία LCC δεν περιορίζεται μόνο στο αρχικό κόστος κατασκευής, αλλά περιλαμβάνει επίσης το λειτουργικό κόστος, το κόστος συντήρησης, τις πιθανές αντικαταστάσεις στοιχείων και το κόστος τέλους ζωής του κτιρίου (Fuller & Petersen, 1996).

Στην παρούσα έρευνα, η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής εφαρμόζεται για τη συγκριτική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών. Η ανάλυση πραγματοποιείται παράλληλα με τη Dynamic LCA, ώστε να επιτευχθεί ολοκληρωμένη περιβαλλοντική και οικονομική αποτίμηση των δύο κατοικιών.

Το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των κατοικιών περιλαμβάνει:

- το αρχικό κόστος κατασκευής,
- το λειτουργικό ενεργειακό κόστος,
- το κόστος συντήρησης,
- το κόστος αντικατάστασης δομικών και ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων,
- και το κόστος τέλους ζωής των κτιρίων.

Για την οικονομική αξιολόγηση χρησιμοποιείται η μέθοδος προεξόφλησης χρηματοροών, μέσω της οποίας οι μελλοντικές δαπάνες μετατρέπονται σε παρούσες αξίες με χρήση κατάλληλου προεξοφλητικού επιτοκίου (ISO 15686-5, 2017). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ακριβέστερη οικονομική αποτίμηση των κατοικιών σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα.

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζεται προεξοφλητικό επιτόκιο 5%, το οποίο είναι τυπικό για ιδιωτικές επενδύσεις στον κτιριακό τομέα (Fuller & Petersen, 1996). Η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV) του κόστους κύκλου ζωής υπολογίζεται με βάση τον παράγοντα προεξόφλησης (annuity factor) για 50 έτη και επιτόκιο 5%, ο οποίος ανέρχεται

σε 18,26. Συγκεκριμένα, η NPV του ετήσιου λειτουργικού και συντήρησης κόστους υπολογίζεται ως εξής:

$$NPV = \text{Αρχικό Κόστος} + (\text{Ετήσιο Λειτουργικό Κόστος} \times \text{Annuity Factor}) + (\text{Ετήσιο Κόστος Συντήρησης} \times \text{Annuity Factor}) \quad (1)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της προεξόφλησης μεταβάλλει σημαντικά τα αποτελέσματα σε σχέση με την ονομαστική (nominal) ανάλυση. Τα μελλοντικά λειτουργικά κόστη, αν και σημαντικά σε απόλυτο μέγεθος, έχουν χαμηλότερη παρούσα αξία λόγω της χρονικής αξίας του χρήματος. Η NPV ανάλυση αναδεικνύει με μεγαλύτερη ακρίβεια το πραγματικό οικονομικό βάρος του αυξημένου αρχικού κόστους κατασκευής της βιοκλιματικής κατοικίας, και για τον λόγο αυτό παρατίθεται συμπληρωματικά στον Πίνακα 21.

Στην περίπτωση της συμβατικής κατοικίας θεωρείται χαμηλότερο αρχικό κόστος κατασκευής αλλά αυξημένο λειτουργικό ενεργειακό κόστος λόγω υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας. Αντίθετα, η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει υψηλότερο αρχικό κόστος λόγω εφαρμογής ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών και βελτιωμένου θερμικού κελύφους, αλλά χαμηλότερο λειτουργικό κόστος κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου (Santamouris, 2016).

Παράλληλα, στο πλαίσιο της ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη πιθανές αυξήσεις του ενεργειακού κόστους και μεταβολές που σχετίζονται με τη μελλοντική εξέλιξη του ενεργειακού τομέα. Η ενσωμάτωση των παραμέτρων αυτών επιτρέπει περισσότερο ρεαλιστική οικονομική αξιολόγηση των κατοικιών σε βάθος χρόνου.

Η εφαρμογή της LCC θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας, καθώς επιτρέπει τη διερεύνηση του κατά πόσο το αυξημένο αρχικό κόστος μίας βιοκλιματικής κατοικίας μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω της μείωσης του λειτουργικού κόστους και της συνολικής βελτίωσης της ενεργειακής της απόδοσης.

3.7 Μεθοδολογία Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA)

Η Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA) αποτελεί ολοκληρωμένη μεθοδολογία αξιολόγησης βιωσιμότητας, η οποία συνδυάζει περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές παραμέτρους σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής

ενός συστήματος (Klöpffer, 2008). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συνολική αποτίμηση της βιωσιμότητας των κατοικιών και τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών και κατασκευαστικών λύσεων.

Στην παρούσα έρευνα, η LCSA εφαρμόζεται για τη συγκριτική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα. Η μεθοδολογία βασίζεται στον συνδυασμό:

- της Dynamic LCA για την περιβαλλοντική αξιολόγηση,
- της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) για την οικονομική αξιολόγηση,
- και κοινωνικών δεικτών που σχετίζονται με την ποιότητα διαβίωσης και τη λειτουργική επίδοση των κατοικιών.

Η περιβαλλοντική διάσταση της LCSA επικεντρώνεται κυρίως στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, στην κατανάλωση ενέργειας και στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω της Dynamic LCA, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική μεταβολή του ενεργειακού μίγματος και των συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας (Slavkovic & Stephan, 2025).

Η οικονομική διάσταση βασίζεται στην εφαρμογή της LCC και περιλαμβάνει το αρχικό κόστος κατασκευής, το λειτουργικό ενεργειακό κόστος, τις δαπάνες συντήρησης και αντικατάστασης στοιχείων, καθώς και το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των κατοικιών (Fuller & Petersen, 1996).

Παράλληλα, η κοινωνική διάσταση της αξιολόγησης περιλαμβάνει παραμέτρους που σχετίζονται με τη θερμική άνεση, την ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, την ενεργειακή απόδοση και τη συνολική ποιότητα διαβίωσης των χρηστών. Η ενσωμάτωση κοινωνικών παραμέτρων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα (UNEP, 2011).

Για την αξιολόγηση της κοινωνικής διάστασης στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν επτά δείκτες βάσει του πλαισίου S-LCA (UNEP, 2011) και της σχετικής βιβλιογραφίας για τον κτιριακό τομέα (Larsen et al., 2022; Bera et al., 2026). Οι δείκτες αυτοί είναι: (α) θερμική άνεση, (β) ποιότητα εσωτερικού αέρα (IAQ), (γ) φυσικός φωτισμός, (δ) κίνδυνος ενεργειακής φτώχειας, (ε) ηχομόνωση και ακουστική άνεση, (στ) υγεία και ευημερία χρηστών, και (ζ) προσαρμοστικότητα στην κλιματική αλλαγή. Η επιλογή τους βασίζεται

στη συχνότητα εμφάνισής τους στη διεθνή βιβλιογραφία ως κεντρικοί κοινωνικοί δείκτες για κατοικίες.

Κάθε δείκτης αξιολογείται σε ημιποσοτική κλίμακα 1 έως 5, όπου 1 αντιστοιχεί σε πολύ χαμηλή επίδοση και 5 σε πολύ υψηλή επίδοση. Οι βαθμολογίες εκχωρούνται βάσει ποιοτικής ανάλυσης των χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων κατοικιών σε συνδυασμό με τα ευρήματα της βιβλιογραφίας. Η ημιποσοτική αυτή προσέγγιση, αν και δεν υποκαθιστά πλήρη ποσοτική S-LCA, αποτελεί αναγνωρισμένη μέθοδο για την αξιολόγηση κοινωνικών δεικτών όταν δεν διατίθενται πρωτογενή δεδομένα (Larsen et al., 2022; UNEP, 2011).

Η εφαρμογή της LCSA στην παρούσα μελέτη πραγματοποιείται μέσω συγκριτικής αξιολόγησης των δύο κατοικιών ως προς τους βασικούς περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς δείκτες. Η συγκριτική προσέγγιση επιτρέπει τη διερεύνηση των συνολικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών κάθε τύπου κατοικίας και τη διαμόρφωση συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα των βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού στον ελληνικό κτιριακό τομέα.

Η χρήση της LCSA θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη σύγχρονη αξιολόγηση κατοικιών, καθώς επιτρέπει την ολοκληρωμένη αποτίμηση της βιωσιμότητας πέρα από τα αποκλειστικά περιβαλλοντικά κριτήρια και συμβάλλει στη λήψη περισσότερο ισορροπημένων και βιώσιμων αποφάσεων στον τομέα των κατασκευών.

3.8 Συλλογή δεδομένων και παραδοχές

Η συλλογή δεδομένων αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο της παρούσας έρευνας, καθώς επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της Dynamic LCA, της LCC και της συνολικής αξιολόγησης βιωσιμότητας μέσω της LCSA. Για τις ανάγκες της μελέτης χρησιμοποιούνται δεδομένα που προέρχονται από διεθνή βιβλιογραφία, ελληνικές τεχνικές προδιαγραφές, τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) και στοιχεία της ελληνικής αγοράς σχετικά με τα δομικά υλικά, την ενεργειακή κατανάλωση και το κόστος κατασκευής κατοικιών.

Η έρευνα βασίζεται σε συγκριτική αξιολόγηση μίας συμβατικής και μίας βιοκλιματικής κατοικίας ίδιου εμβαδού και παρόμοιας λειτουργικής χρήσης. Για λόγους συγκρισιμότητας εφαρμόζονται κοινές παραδοχές ως προς τις κλιματικές συνθήκες, τον αριθμό χρηστών και το προφίλ λειτουργίας των κατοικιών.

Στην παρούσα μελέτη θεωρείται ότι και οι δύο κατοικίες διαθέτουν συνολική επιφάνεια 120 m² και διάρκεια ζωής 50 ετών. Η συμβατική κατοικία χαρακτηρίζεται από υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και περιορισμένη εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών, ενώ η βιοκλιματική κατοικία διαθέτει βελτιωμένο θερμικό κέλυφος, αυξημένη ενεργειακή απόδοση και αξιοποίηση παθητικών συστημάτων σχεδιασμού.

Για την εφαρμογή της Dynamic LCA χρησιμοποιούνται χρονικά μεταβαλλόμενοι συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι βασίζονται σε σενάρια ενεργειακής μετάβασης και σταδιακής απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα. Παράλληλα, για την οικονομική αξιολόγηση μέσω της LCC λαμβάνονται υπόψη τόσο το αρχικό κόστος κατασκευής όσο και οι λειτουργικές δαπάνες, οι εργασίες συντήρησης και οι πιθανές αντικαταστάσεις στοιχείων κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών.

Οι βασικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του μοντέλου ανάλυσης παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6 Βασικές παραδοχές μοντέλου ανάλυσης

Παράμετρος	Τιμή / Παραδοχή
Επιφάνεια κατοικίας	120 m ²
Χρονικός ορίζοντας ανάλυσης	50 έτη
Τύποι κατοικιών	Συμβατική και Βιοκλιματική
Γεωγραφική θέση	Ελλάδα
Κλιματικές συνθήκες	Ίδιες για όλα τα σενάρια
Αριθμός χρηστών κατοικίας	Ίδιος και στα δύο σενάρια
Προφίλ χρήσης	Ίδιες συνθήκες καθημερινής λειτουργίας
Εξεταζόμενες φάσεις κύκλου ζωής	Κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση, τέλος ζωής
Περιβαλλοντική αξιολόγηση	Dynamic LCA
Οικονομική αξιολόγηση	LCC
Συνολική αξιολόγηση βιωσιμότητας	LCSA

Μονάδα σύγκρισης	Ανά κατοικία / ανά 120 m ²
Κριτήριο σύγκρισης	Περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική επίδοση

Οι παραδοχές αυτές αποτελούν τη βάση της συγκριτικής ανάλυσης και εφαρμόζονται ομοιόμορφα σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, ώστε να διασφαλίζεται η συγκρισιμότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της έρευνας (International Organization for Standardization, 2006).

3.8.1 Δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας

Τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας αποτελούν βασική παράμετρο της παρούσας έρευνας, καθώς επηρεάζουν άμεσα τα αποτελέσματα της Dynamic LCA και της συνολικής αξιολόγησης βιωσιμότητας των κατοικιών. Η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας θεωρείται μία από τις σημαντικότερες πηγές περιβαλλοντικών επιπτώσεων στον κτιριακό τομέα, ιδιαίτερα κατά τη φάση λειτουργίας των κατοικιών (Asdrubali et al., 2024).

Αμφότερες οι κατοικίες θεωρείται ότι βρίσκονται στην Κλιματική Ζώνη Β της Ελλάδας, όπως αυτή ορίζεται από τον KENAK, καλύπτοντας περιοχές όπως η Αττική και η Θεσσαλονίκη. Η συμβατική κατοικία εκπροσωπεί το τυπικό υφιστάμενο ελληνικό κτιριακό απόθεμα κατασκευής προ του 2011, το οποίο αποτελεί την πλειονότητα των κατοικιών στη χώρα και χαρακτηρίζεται από Ενεργειακή Κατηγορία Γ βάσει KENAK, με ετήσια κατανάλωση 140 kWh/m²·έτος. Η βιοκλιματική κατοικία αντιπροσωπεύει νέα κατασκευή με εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού, Κατηγορίας Β, με ετήσια κατανάλωση 85 kWh/m²·έτος (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2020· Santamouris, 2016).

Για τις ανάγκες της μελέτης, η κατανάλωση ενέργειας περιλαμβάνει τις απαιτήσεις για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, αερισμό και χρήση ηλεκτρικών συσκευών. Τα δεδομένα βασίζονται σε παραδοχές που προκύπτουν από τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK), από διεθνή βιβλιογραφικά δεδομένα και από στοιχεία που αφορούν την ενεργειακή συμπεριφορά κατοικιών στην Ελλάδα.

Η συμβατική κατοικία θεωρείται ότι παρουσιάζει αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω περιορισμένης θερμομονωτικής ικανότητας, χαμηλότερης ενεργειακής απόδοσης του

κελύφους και περιορισμένης εφαρμογής παθητικών στρατηγικών σχεδιασμού. Για τις ανάγκες της ανάλυσης θεωρείται ετήσια κατανάλωση ενέργειας 140 kWh/m².

Αντίθετα, η βιοκλιματική κατοικία χαρακτηρίζεται από μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω βελτιωμένης θερμομόνωσης, ενεργειακά αποδοτικών κουφωμάτων, σωστού προσανατολισμού και αξιοποίησης παθητικών συστημάτων φυσικού φωτισμού και αερισμού. Για τη βιοκλιματική κατοικία θεωρείται ετήσια κατανάλωση ενέργειας 85 kWh/m², σύμφωνα με δεδομένα ενεργειακά αποδοτικών κατοικιών και σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές (Santamouris, 2016).

Στο πλαίσιο της Dynamic LCA, η κατανάλωση ενέργειας συνδυάζεται με χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να αποτυπώνεται η δυναμική εξέλιξη των λειτουργικών εκπομπών των κατοικιών σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει ακριβέστερη αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συγκριτικά με συμβατικές static LCA προσεγγίσεις (Su et al., 2021).

Τα δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7 Δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης κατοικιών

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Επιφάνεια κατοικίας	120 m ²	120 m ²
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας	140 kWh/m ²	85 kWh/m ²
Θερμομόνωση	Βασική	Ενισχυμένη
Κουφώματα	Συμβατικά	Ενεργειακά αποδοτικά
Φυσικός αερισμός	Περιορισμένος	Εκτεταμένος
Σύστημα θέρμανσης	Λέβητας πετρελαίου/αερίου	Αντλία θερμότητας
Αξιοποίηση ΑΠΕ	Όχι	Ναι
Ενεργειακή απόδοση	Χαμηλότερη	Υψηλότερη

Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των λειτουργικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της συνολικής ενεργειακής επίδοσης των δύο κατοικιών στο πλαίσιο της Dynamic LCA και της LCSA.

3.8.2 Δομικά υλικά

Τα δομικά υλικά αποτελούν ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο της παρούσας έρευνας, καθώς επηρεάζουν σημαντικά τις ενσωματωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κατοικιών κατά τα στάδια παραγωγής, κατασκευής, συντήρησης και τέλους ζωής. Η επιλογή των υλικών επηρεάζει άμεσα τόσο τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα όσο και τη συνολική ενεργειακή επίδοση των κτιρίων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους (Asdrubali et al., 2024).

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται τα βασικά δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη συμβατική και στη βιοκλιματική κατοικία, με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών τους. Και στις δύο κατοικίες θεωρείται ότι ο φέρων οργανισμός αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τις συνήθειες κατασκευαστικές πρακτικές στον ελληνικό κτιριακό τομέα.

Η συμβατική κατοικία χαρακτηρίζεται από χρήση συμβατικών δομικών υλικών και βασικών επιπέδων θερμομόνωσης, χωρίς εκτεταμένη εφαρμογή προηγμένων ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών. Αντίθετα, η βιοκλιματική κατοικία περιλαμβάνει βελτιωμένα θερμομονωτικά υλικά, ενεργειακά αποδοτικά κουφώματα, προηγμένα συστήματα σκίασης και τεχνολογίες αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με στόχο τη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας και των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Givoni, 1994· Olgyay, 1963).

Η επιλογή ενεργειακά αποδοτικών υλικών στη βιοκλιματική κατοικία οδηγεί σε αυξημένες ενσωματωμένες εκπομπές κατά το στάδιο κατασκευής λόγω της παραγωγής ορισμένων τεχνολογικά προηγμένων υλικών. Ωστόσο, οι αυξημένες αρχικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκτιμάται ότι αντισταθμίζονται από τη σημαντική μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου.

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά και τα δομικά στοιχεία των δύο κατοικιών παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενων κατοικιών

Τεχνικό Χαρακτηριστικό	Συμβατική Κατοικία	Βιοκλιματική Κατοικία
Επιφάνεια	120 m ²	120 m ²
Φέρων οργανισμός	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Οπλισμένο σκυρόδεμα
Τοιχοποιία	Συμβατική διπλή τοιχοποιία	Ενισχυμένη ενεργειακή τοιχοποιία
Θερμομόνωση τοιχοποιίας	Βασική	Υψηλής απόδοσης
Θερμομόνωση οροφής	Βασική	Ενισχυμένη
Τύπος κουφωμάτων	Αλουμίνιο απλό	Θερμοδιακοπτόμενα ενεργειακά
Υαλοπίνακες	Διπλοί συμβατικοί	Διπλοί low-e ενεργειακοί
Σύστημα θέρμανσης	Λέβητας φυσικού αερίου/πετρελαίου	Αντλία θερμότητας
Σύστημα ψύξης	Κλιματιστικές μονάδες	Σύστημα υψηλής ενεργειακής απόδοσης
Παραγωγή ZNX	Ηλεκτρικός θερμοσίφωνα	Ηλιακός θερμοσίφωνα
Φωτοβολταϊκά	Όχι	Ναι
Σκίαση	Βασική	Προηγμένα συστήματα σκίασης
Φυσικός αερισμός	Περιορισμένος	Βελτιστοποιημένος
Εκμετάλλευση φυσικού φωτισμού	Μέτρια	Υψηλή

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας λαμβάνονται υπόψη και οι ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα (embodied carbon) που σχετίζονται με την παραγωγή των βασικών δομικών υλικών. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα, οι ενσωματωμένες εκπομπές μιας τυπικής κατοικίας 120 m² εκτιμώνται σε 30.000–42.000 kg CO₂, αντιστοιχώντας σε 250–350 kg CO₂/m² (Asdrubali et al., 2024· Finnveden et al., 2009). Οι εκπομπές αυτές προκύπτουν κυρίως από την παραγωγή οπλισμένου σκυροδέματος και χάλυβα, τα οποία αποτελούν τα βασικά δομικά υλικά και των δύο κατοικιών. Συγκρίνοντας τις ενσωματωμένες εκπομπές (~30.000–42.000 kg CO₂) με τις συνολικές λειτουργικές εκπομπές της συμβατικής κατοικίας (213.360 kg CO₂) και της βιοκλιματικής κατοικίας (129.540 kg CO₂) σε χρονικό

ορίζοντα 50 ετών, προκύπτει ότι οι λειτουργικές εκπομπές κυριαρχούν έναντι των ενσωματωμένων, αντιπροσωπεύοντας το 80–85% των συνολικών εκπομπών κύκλου ζωής. Το εύρημα αυτό δικαιολογεί την εστίαση της παρούσας έρευνας στις λειτουργικές εκπομπές και επιβεβαιώνει τη σημασία της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης ως κύριο μέσο περιορισμού του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών (Slavkovic & Stephan, 2025).

Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της Dynamic LCA, της LCC και της συνολικής αξιολόγησης βιωσιμότητας μέσω της LCSA, με στόχο τη συγκριτική αποτίμηση της περιβαλλοντικής και λειτουργικής επίδοσης των δύο κατοικιών.

3.8.3 Συντελεστές εκπομπών

Οι συντελεστές εκπομπών αποτελούν βασικό στοιχείο της Dynamic LCA, καθώς χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας και τη χρήση δομικών υλικών κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν την ποσότητα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που αντιστοιχεί σε μία μονάδα κατανάλωσης ενέργειας ή παραγωγής υλικού και χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος των κτιρίων (ISO 14044, 2006).

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιούνται συντελεστές εκπομπών που βασίζονται σε διεθνή βιβλιογραφικά δεδομένα, σε ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων περιβαλλοντικής αξιολόγησης και σε στοιχεία που σχετίζονται με το ελληνικό ενεργειακό σύστημα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις εκπομπές που προκύπτουν από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας των κατοικιών.

Για τη συμβατική static LCA χρησιμοποιούνται συνήθως σταθεροί συντελεστές εκπομπών για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα της ανάλυσης. Ωστόσο, στην παρούσα έρευνα εφαρμόζεται δυναμική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία οι συντελεστές εκπομπών μεταβάλλονται σε βάθος χρόνου λόγω της σταδιακής απανθρακοποίησης του ενεργειακού μίγματος και της αυξανόμενης συμμετοχής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Su et al., 2021).

Η δυναμική αυτή προσέγγιση θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση των λειτουργικών εκπομπών των κατοικιών, καθώς η περιβαλλοντική επίδοση των κτιρίων επηρεάζεται σημαντικά από τη μελλοντική εξέλιξη του ενεργειακού τομέα. Με τον τρόπο

αυτό επιτυγχάνεται περισσότερο ρεαλιστική αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συγκριτικά με τις συμβατικές static LCA προσεγγίσεις (Slavkovic & Stephan, 2025).

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται αρχικός συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας ίσος με 0,40 kg CO₂/kWh, σύμφωνα με δεδομένα που σχετίζονται με το ελληνικό ενεργειακό μίγμα. Παράλληλα, θεωρείται σταδιακή μείωση του συντελεστή εκπομπών κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών λόγω αύξησης της συμμετοχής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα.

Οι βασικοί συντελεστές εκπομπών και οι σχετικές παραδοχές παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9 Βασικοί συντελεστές εκπομπών και παραδοχές

Παράμετρος	Τιμή / Παραδοχή
Αρχικός συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας	0,40 kg CO ₂ /kWh
Προσέγγιση αξιολόγησης	Dynamic LCA
Μεταβολή συντελεστών εκπομπών	Χρονικά μεταβαλλόμενη
Ενεργειακό μίγμα	Σταδιακή απανθρακοποίηση
Χρονικός ορίζοντας	50 έτη
Βασικός δείκτης περιβαλλοντικής αξιολόγησης	GWP (Global Warming Potential)
Μονάδα εκπομπών	kg CO ₂ -eq
Πηγές δεδομένων	Βιβλιογραφία, KENAK, διεθνείς βάσεις δεδομένων

Οι συντελεστές εκπομπών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των λειτουργικών και ενσωματωμένων εκπομπών των κατοικιών και αποτελούν βασικό στοιχείο της συγκριτικής αξιολόγησης της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας μέσω της Dynamic LCA και της LCSA.

3.8.4 Οικονομικά δεδομένα

Τα οικονομικά δεδομένα αποτελούν βασική παράμετρο της παρούσας έρευνας, καθώς χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle

Cost – LCC) και τη συνολική οικονομική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας. Η οικονομική αξιολόγηση δεν περιορίζεται μόνο στο αρχικό κόστος κατασκευής, αλλά περιλαμβάνει επίσης το λειτουργικό ενεργειακό κόστος, τις δαπάνες συντήρησης και τις πιθανές αντικαταστάσεις στοιχείων κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών (Fuller & Petersen, 1996).

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης χρησιμοποιούνται δεδομένα που βασίζονται σε στοιχεία της ελληνικής αγοράς, σε τεχνικές προδιαγραφές, σε τιμές κατασκευαστικού κόστους και σε βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με το κόστος ενεργειακά αποδοτικών κατοικιών στην Ελλάδα.

Η συμβατική κατοικία θεωρείται ότι παρουσιάζει χαμηλότερο αρχικό κόστος κατασκευής λόγω χρήσης συμβατικών δομικών υλικών και βασικών τεχνολογικών συστημάτων. Για τις ανάγκες της ανάλυσης θεωρείται κόστος κατασκευής 1.700 €/m². Ωστόσο, η υψηλότερη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας οδηγεί σε αυξημένο λειτουργικό κόστος κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου.

Αντίθετα, η βιοκλιματική κατοικία χαρακτηρίζεται από αυξημένο αρχικό κόστος κατασκευής λόγω εφαρμογής ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών, βελτιωμένου θερμικού κελύφους, ενεργειακών κουφωμάτων και συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για τις ανάγκες της έρευνας θεωρείται κόστος κατασκευής 2.000 €/m². Παρόλα αυτά, η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και οι χαμηλότερες λειτουργικές απαιτήσεις οδηγούν σε μειωμένο συνολικό λειτουργικό κόστος σε μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα (Santamouris, 2016).

Στο πλαίσιο της οικονομικής αξιολόγησης λαμβάνονται επίσης υπόψη:

- οι ετήσιες δαπάνες συντήρησης,
- οι πιθανές αντικαταστάσεις δομικών και ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων,
- και η εξέλιξη του ενεργειακού κόστους κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω προεξόφλησης των μελλοντικών χρηματοροών σε παρούσες αξίες, σύμφωνα με τις βασικές αρχές της LCC και των προτύπων ISO 15686-5 (ISO 15686-5, 2017).

Τα βασικά οικονομικά δεδομένα και οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10 Βασικά οικονομικά δεδομένα και παραδοχές

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Κόστος κατασκευής	1.700 €/m ²	2.000 €/m ²
Συνολικό αρχικό κόστος	Χαμηλότερο	Υψηλότερο
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας	Υψηλή	Χαμηλή
Λειτουργικό ενεργειακό κόστος	Αυξημένο	Μειωμένο
Ετήσιο κόστος συντήρησης	1.500 €	1.200 €
Κόστος αντικαταστάσεων	Μέτριο	Αυξημένο αρχικά
Χρονικός ορίζοντας ανάλυσης	50 έτη	50 έτη
Μέθοδος οικονομικής αξιολόγησης	LCC	LCC

Τα οικονομικά δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τη συγκριτική αξιολόγηση του συνολικού κόστους κύκλου ζωής των δύο κατοικιών και για την εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας των βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού στον ελληνικό κτιριακό τομέα.

3.9 Εργαλεία και λογισμικά ανάλυσης

Για την ανάπτυξη και εφαρμογή της παρούσας έρευνας χρησιμοποιούνται υπολογιστικά και βιβλιογραφικά εργαλεία με στόχο την οργάνωση των δεδομένων, την εκτέλεση των υπολογισμών και τη συγκριτική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας.

Η κύρια επεξεργασία των δεδομένων και η ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου πραγματοποιείται μέσω του Microsoft Excel. Το λογισμικό χρησιμοποιείται για:

- την οργάνωση των δεδομένων εισόδου,
- τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης,
- τον υπολογισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα,

- την εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενων συντελεστών εκπομπών,
- τον υπολογισμό του κόστους κύκλου ζωής,
- και τη δημιουργία συγκριτικών πινάκων και διαγραμμάτων.

Η χρήση του Microsoft Excel θεωρείται κατάλληλη για την ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου αξιολόγησης, καθώς επιτρέπει την εφαρμογή σεναρίων χρονικής μεταβολής του ενεργειακού μίγματος και την προσαρμογή των παραμέτρων της Dynamic LCA και της LCC σύμφωνα με τις ανάγκες της έρευνας.

Για τη βιβλιογραφική τεκμηρίωση της μελέτης χρησιμοποιούνται επιστημονικές βάσεις δεδομένων και ψηφιακές βιβλιοθήκες, όπως το ScienceDirect, το Google Scholar και η ψηφιακή βιβλιοθήκη του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου. Οι πηγές αυτές αξιοποιούνται για τη συλλογή επιστημονικών άρθρων, βιβλιογραφικών δεδομένων και μελετών σχετικών με τη Dynamic LCA, τη LCSA, τη βιοκλιματική αρχιτεκτονική και την ενεργειακή αξιολόγηση κτιρίων.

Παράλληλα, για την υποστήριξη της βιβλιογραφικής αναζήτησης και της ανάλυσης επιστημονικών δημοσιεύσεων χρησιμοποιείται το εργαλείο SciSpace, το οποίο συμβάλλει στη συστηματική αναζήτηση και οργάνωση της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας.

Η σύνταξη, μορφοποίηση και τελική επεξεργασία της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μέσω του Microsoft Word, σύμφωνα με τις προδιαγραφές ακαδημαϊκής συγγραφής του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου.

Η χρήση των παραπάνω εργαλείων επιτρέπει την ανάπτυξη ολοκληρωμένου μοντέλου συγκριτικής αξιολόγησης βιωσιμότητας, το οποίο συνδυάζει περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές παραμέτρους μέσω της εφαρμογής Dynamic LCA, LCC και LCSA.

3.10 Ανάλυση Ευαισθησίας

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία και η ευστάθεια των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς τρεις κρίσιμες παραμέτρους: (α) την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, (β) το προεξοφλητικό επιτόκιο (discount rate) και (γ) τον ρυθμό αποανθρακοποίησης του ενεργειακού μίγματος. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει τη διερεύνηση του κατά πόσο τα βασικά συμπεράσματα παραμένουν σταθερά υπό

διαφορετικές παραδοχές, συμπληρώνοντας έτσι την κύρια ανάλυση (Fuller & Petersen, 1996; Slavkovic & Stephan, 2025).

Σενάριο 1 — Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (0,15 / 0,20 / 0,30 €/kWh)

Εξετάζονται τρία επίπεδα τιμής ενέργειας: χαμηλό (0,15 €/kWh), βασικό (0,20 €/kWh) και υψηλό (0,30 €/kWh). Η επιλογή αυτή αντικατοπτρίζει την αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των τιμών ενέργειας σε βάθος 50 ετών, λαμβάνοντας υπόψη πιθανές αυξήσεις λόγω φόρων άνθρακα και μεταβολών της αγοράς ενέργειας.

Σενάριο 2 — Προεξοφλητικό επιτόκιο (3% / 5% / 7%)

Εξετάζονται τρία επίπεδα discount rate: χαμηλό (3%, τυπικό για δημόσιες μελέτες στην ΕΕ), βασικό (5%, τυπικό για ιδιωτικές επενδύσεις) και υψηλό (7%, συντηρητικό σενάριο). Η επιλογή του discount rate επηρεάζει καθοριστικά τη σχετική σημασία των μελλοντικών λειτουργικών εξοικονομήσεων έναντι του αρχικού κόστους επένδυσης (ISO 15686-5, 2017).

Σενάριο 3 — Ρυθμός αποανθρακοποίησης (αργό / βασικό / γρήγορο)

Εξετάζονται τρία σενάρια εξέλιξης του συντελεστή εκπομπών του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου: αργό (μείωση από 0,40 σε 0,24 kg CO₂/kWh σε 50 έτη), βασικό (0,40 → 0,12, που αντιστοιχεί στο κύριο μοντέλο) και γρήγορο (0,40 → 0,05, σενάριο ταχείας ενεργειακής μετάβασης). Τα σενάρια αυτά αντικατοπτρίζουν την αβεβαιότητα ως προς τον ρυθμό ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ελληνικό δίκτυο (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020).

3.11 Περιορισμοί της έρευνας

Η παρούσα έρευνα βασίζεται σε συγκριτική αξιολόγηση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας μέσω της εφαρμογής Dynamic LCA, LCC και LCSA. Παρότι η μεθοδολογία επιτρέπει ολοκληρωμένη προσέγγιση της βιωσιμότητας των κατοικιών, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα δεδομένων, τις παραδοχές του μοντέλου και τη φύση της δυναμικής περιβαλλοντικής αξιολόγησης.

Ένας βασικός περιορισμός αφορά τη διαθεσιμότητα και την ακρίβεια των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη Dynamic LCA. Η εφαρμογή δυναμικών μοντέλων απαιτεί χρονικά μεταβαλλόμενα δεδομένα σχετικά με το ενεργειακό μίγμα, τους συντελεστές εκπομπών και

τις τεχνολογικές εξελίξεις, τα οποία σε αρκετές περιπτώσεις βασίζονται σε σενάρια και προβλέψεις μελλοντικής εξέλιξης και όχι σε απόλυτα βέβαια δεδομένα (Slavkovic & Stephan, 2025).

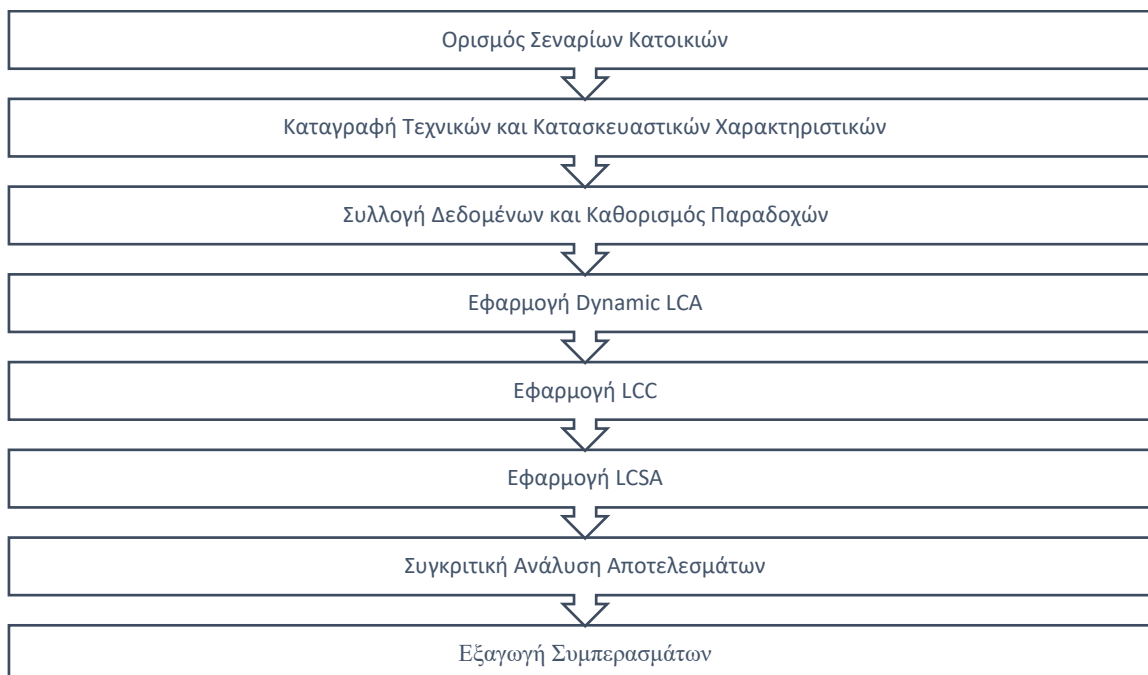
Παράλληλα, η παρούσα έρευνα βασίζεται σε βιβλιογραφικά δεδομένα και σε παραδοχές σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος κατασκευής και τη λειτουργική συμπεριφορά των κατοικιών. Ως αποτέλεσμα, τα αποτελέσματα της ανάλυσης επηρεάζονται από τις συγκεκριμένες παραδοχές που υιοθετούνται στο πλαίσιο της μελέτης.

Ένας ακόμη περιορισμός σχετίζεται με τη χρήση υπολογιστικού μοντέλου που αναπτύχθηκε μέσω Microsoft Excel και όχι μέσω εξειδικευμένων λογισμικών LCA, όπως το SimaPro ή το OpenLCA. Παρότι η χρήση Excel επιτρέπει την ανάπτυξη προσαρμοσμένου δυναμικού μοντέλου και θεωρείται επαρκής για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας, ενδέχεται να παρουσιάζει περιορισμούς ως προς την αυτοματοποίηση διαδικασιών και την ενσωμάτωση εκτεταμένων περιβαλλοντικών βάσεων δεδομένων.

Επιπλέον, η κοινωνική διάσταση της LCSA παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς σε διεθνές επίπεδο λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας ποσοτικοποιημένων κοινωνικών δεικτών και της έλλειψης πλήρως τυποποιημένων μεθοδολογιών κοινωνικής αξιολόγησης στον κτιριακό τομέα (UNEP, 2011).

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται σε δύο συγκεκριμένα σενάρια κατοικιών στην Ελλάδα και δεν εξετάζει το σύνολο των πιθανών τεχνολογικών, γεωγραφικών ή κλιματικών διαφοροποιήσεων που μπορεί να επηρεάζουν την περιβαλλοντική και οικονομική επίδοση των κτιρίων. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της έρευνας δεν μπορούν να γενικευθούν πλήρως για κάθε τύπο κατοικίας ή κάθε γεωγραφική περιοχή.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η εφαρμογή Dynamic LCA, LCC και LCSA στην παρούσα εργασία παρέχει ολοκληρωμένη και ρεαλιστική προσέγγιση συγκριτικής αξιολόγησης βιωσιμότητας κατοικιών και συμβάλλει στην κατανόηση των περιβαλλοντικών και οικονομικών πλεονεκτημάτων των βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού στον ελληνικό κτιριακό τομέα.



Σχήμα 5 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας αξιολόγησης

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθείται για την αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια συλλογής δεδομένων, εφαρμογής επιμέρους αναλυτικών εργαλείων και σύνθεσης των αποτελεσμάτων με στόχο την εξαγωγή ολοκληρωμένων συμπερασμάτων (International Organization for Standardization, 2006).

4. Αποτελέσματα και συγκριτική αξιολόγηση

4.1 Υπολογισμός λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας

Η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας αποτελεί βασική παράμετρο της συγκριτικής αξιολόγησης της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας, καθώς επηρεάζει τόσο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο και το λειτουργικό κόστος κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων. Στην παρούσα ενότητα υπολογίζεται η ετήσια και συνολική κατανάλωση ενέργειας των δύο κατοικιών για χρονικό ορίζοντα 50 ετών.

Για τη συμβατική κατοικία θεωρείται ετήσια κατανάλωση ενέργειας 140 kWh/m², ενώ για τη βιοκλιματική κατοικία 85 kWh/m², σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα ενεργειακά αποδοτικών κατοικιών (Santamouris, 2016; Asdrubali et al., 2024).

Δεδομένου ότι και οι δύο κατοικίες έχουν επιφάνεια 120 m², η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται ως εξής:

- **Συμβατική κατοικία:**

$$140 \text{ kWh/m}^2 \times 120 \text{ m}^2 = 16.800 \text{ kWh/έτος}$$

- **Βιοκλιματική κατοικία:**

$$85 \text{ kWh/m}^2 \times 120 \text{ m}^2 = 10.200 \text{ kWh/έτος}$$

Η διαφορά στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των δύο κατοικιών ανέρχεται σε:

$$16.800 - 10.200 = 6.600 \text{ kWh/έτος}$$

Η μείωση της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης της βιοκλιματικής κατοικίας σε σχέση με τη συμβατική κατοικία υπολογίζεται ως:

$$(6.600 / 16.800) \times 100 = 39,3\%$$

Πίνακας 11 Υπολογισμός ετήσιας λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Επιφάνεια κατοικίας	120 m ²	120 m ²
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά m ²	140 kWh/m ²	85 kWh/m ²

Συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας	16.800 kWh/έτος	10.200 kWh/έτος
Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας	-	6.600 kWh/έτος
Ποσοστό μείωσης κατανάλωσης	-	39,3%

Σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών, χωρίς να ληφθεί υπόψη μεταβολή της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας, η συνολική λειτουργική κατανάλωση υπολογίζεται ως εξής:

- Συμβατική κατοικία:

$$16.800 \text{ kWh/έτος} \times 50 \text{ έτη} = 840.000 \text{ kWh}$$

- Βιοκλιματική κατοικία:

$$10.200 \text{ kWh/έτος} \times 50 \text{ έτη} = 510.000 \text{ kWh}$$

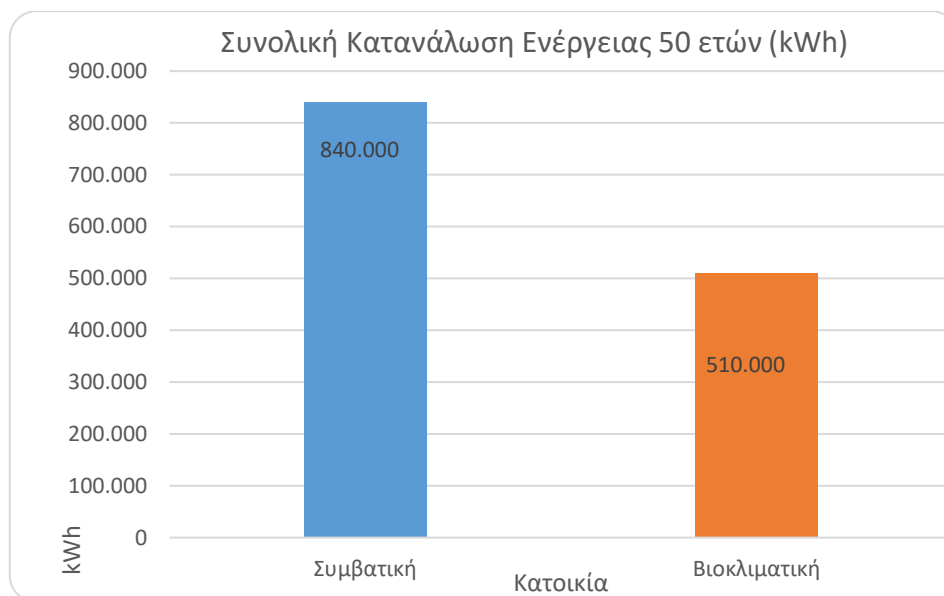
Η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας της βιοκλιματικής κατοικίας σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών ανέρχεται σε:

$$840.000 - 510.000 = 330.000 \text{ kWh}$$

Πίνακας 12 Συνολική λειτουργική κατανάλωση ενέργειας σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας	16.800 kWh/έτος	10.200 kWh/έτος
Χρονικός ορίζοντας	50 έτη	50 έτη
Συνολική κατανάλωση ενέργειας	840.000 kWh	510.000 kWh
Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας	-	330.000 kWh
Ποσοστό μείωσης	-	39,3%

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τη συμβατική κατοικία. Η μείωση κατά 39,3% οφείλεται κυρίως στη βελτιωμένη θερμομόνωση, στα ενεργειακά αποδοτικά κουφώματα, στην αξιοποίηση φυσικού αερισμού και φωτισμού, καθώς και στη χρήση αποδοτικότερων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης.



Σχήμα 6 Σύγκριση συνολικής λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών

Η διαφορά αυτή αποτελεί βασική παράμετρο για τους επόμενους υπολογισμούς της Dynamic LCA, καθώς η χαμηλότερη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας οδηγεί σε μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια ζωής της βιοκλιματικής κατοικίας.

4.2 Υπολογισμός εκπομπών CO₂ μέσω Dynamic LCA

Στην παρούσα ενότητα υπολογίζονται οι λειτουργικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα των δύο κατοικιών μέσω της μεθοδολογίας Dynamic LCA. Σε αντίθεση με τη συμβατική στατική προσέγγιση, η Dynamic LCA λαμβάνει υπόψη τη χρονική μεταβολή των συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της σταδιακής απανθρακοποίησης του ενεργειακού μίγματος (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020; Slavkovic & Stephan, 2025).

Για τις ανάγκες της μελέτης υιοθετούνται οι ακόλουθοι συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας:

Πίνακας 13 Χρονική εξέλιξη συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας

Έτος	Συντελεστής εκπομπών (kg CO ₂ /kWh)
0	0,40
10	0,32
20	0,25
30	0,18
40	0,12
50	0,08

Οι τιμές αυτές αποτυπώνουν ένα σενάριο σταδιακής αύξησης της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα και μείωσης της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα (Su et al., 2021).

Για τον υπολογισμό των εκπομπών χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\text{Εκπομπές CO}_2 = \text{Κατανάλωση Ενέργειας} \times \text{Συντελεστής Εκπομπών} \quad (2)$$

Με βάση τις τιμές της κατανάλωσης ενέργειας που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα:

- Συμβατική κατοικία: 16.800 kWh/έτος
- Βιοκλιματική κατοικία: 10.200 kWh/έτος

προκύπτουν οι ακόλουθες ετήσιες εκπομπές.

Πίνακας 14 Ετήσιες εκπομπές CO₂ ανά χρονική περίοδο

Έτος	Συμβατική κατοικία (kg CO ₂ /έτος)	Βιοκλιματική κατοικία (kg CO ₂ /έτος)
0	6.720	4.080
10	5.376	3.264
20	4.200	2.550
30	3.024	1.836

40	2.016	1.224
50	1.344	816

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι οι εκπομπές και των δύο κατοικιών μειώνονται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου λόγω της σταδιακής βελτίωσης του ενεργειακού μίγματος. Ωστόσο, η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει διαχρονικά χαμηλότερες εκπομπές εξαιτίας της μικρότερης ενεργειακής κατανάλωσης.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 14 δείχνουν ότι οι λειτουργικές εκπομπές μειώνονται προοδευτικά κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών λόγω της σταδιακής αποανθρακοποίησης του ενεργειακού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής. Σε αντίθεση με τη συμβατική στατική LCA, η οποία χρησιμοποιεί έναν σταθερό συντελεστή εκπομπών για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του κτιρίου, η Dynamic LCA λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται πιο ρεαλιστική αποτύπωση των μελλοντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατοικιών (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020; Slavkovic & Stephan, 2025).

Για την εκτίμηση των συνολικών λειτουργικών εκπομπών σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών, κάθε συντελεστής εκπομπών θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει μία δεκαετή περίοδο λειτουργίας του κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό, ο υπολογισμός δεν βασίζεται σε έναν ενιαίο μέσο συντελεστή, αλλά στη χρονική μεταβολή του ενεργειακού μίγματος ανά περίοδο, γεγονός που ενισχύει τη δυναμική προσέγγιση της ανάλυσης.

Οι εκπομπές κάθε δεκαετίας υπολογίζονται ως:

$$\text{Εκπομπές CO}_2 \text{ δεκαετίας} = \frac{\text{Ετήσια κατανάλωση ενέργειας}}{\text{εκπομπών}} \times 10 \text{ έτη} \times \text{Συντελεστής} \quad (3)$$

Πίνακας 15 Εκπομπές CO₂ ανά δεκαετία

Περίοδος	Συντελεστής εκπομπών (kg CO ₂ /kWh)	Συμβατική κατοικία (kg CO ₂)	Βιοκλιματική κατοικία (kg CO ₂)
0–10 έτη	0,40	67.200	40.800
10–20 έτη	0,32	53.760	32.640

20–30 έτη	0,25	42.000	25.500
30–40 έτη	0,18	30.240	18.360
40–50 έτη	0,12	20.160	12.240
Σύνολο	-	213.360	129.540

Από τον Πίνακα 15 προκύπτει ότι οι συνολικές λειτουργικές εκπομπές της συμβατικής κατοικίας σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών ανέρχονται σε 213.360 kg CO₂, ενώ οι αντίστοιχες εκπομπές της βιοκλιματικής κατοικίας ανέρχονται σε 129.540 kg CO₂.

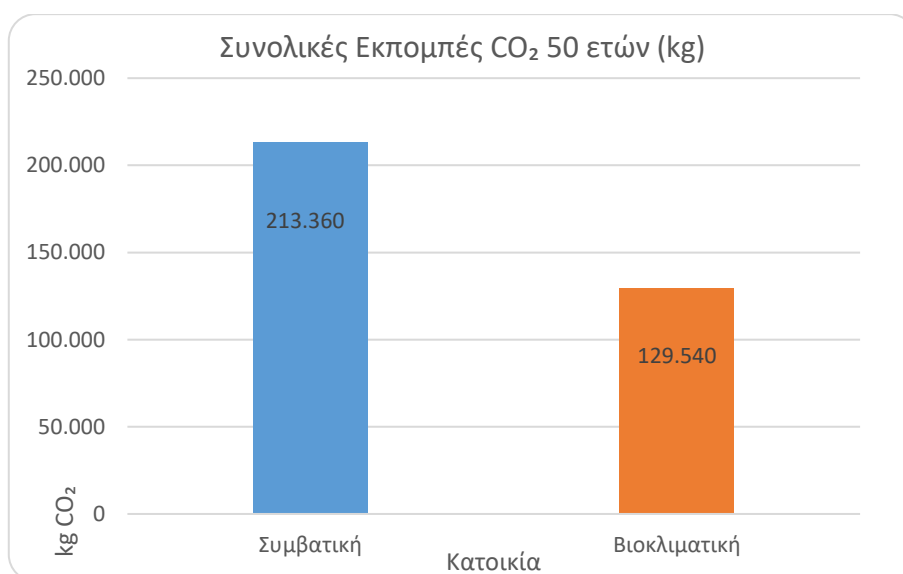
Η συνολική μείωση εκπομπών υπολογίζεται ως:

$$213.360 - 129.540 = 83.820 \text{ kg CO}_2$$

Το ποσοστό μείωσης είναι:

$$83.820 / 213.360 \times 100 = 39,3\%$$

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βιοκλιματική κατοικία επιτυγχάνει σημαντική μείωση των λειτουργικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τη συμβατική κατοικία. Η συνολική μείωση ανέρχεται σε 83.820 kg CO₂ κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, γεγονός που αναδεικνύει τη συμβολή των βιοκλιματικών στρατηγικών στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατοικιών.



Σχήμα 7 Σύγκριση συνολικών λειτουργικών εκπομπών CO₂ συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας
Πηγή: Ίδια επεξεργασία (Excel)

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6, η βιοκλιματική κατοικία εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερες συνολικές λειτουργικές εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με τη συμβατική κατοικία. Συγκεκριμένα, οι συνολικές εκπομπές της συμβατικής κατοικίας ανέρχονται σε 213.360 kg CO₂, ενώ της βιοκλιματικής κατοικίας σε 129.540 kg CO₂ για χρονικό ορίζοντα 50 ετών. Η διαφορά αυτή αντιστοιχεί σε μείωση 83.820 kg CO₂ ή περίπου 39,3%, γεγονός που επιβεβαιώνει τη θετική επίδραση του βιοκλιματικού σχεδιασμού στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κτιρίων.

Τα αποτελέσματα αυτά θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τη συνολική αξιολόγηση βιωσιμότητας μέσω της μεθοδολογίας LCSA.

4.2.1 Σύγκριση Static LCA και Dynamic LCA

Προκειμένου να αναδειχθεί η σημασία της δυναμικής προσέγγισης, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων της Dynamic LCA με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που θα προέκυπταν από εφαρμογή συμβατικής στατικής LCA. Στη Static LCA χρησιμοποιείται σταθερός συντελεστής εκπομπών 0,40 kg CO₂/kWh για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα των 50 ετών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η σταδιακή απανθρακοποίηση του ενεργειακού μίγματος.

Πίνακας 16 Σύγκριση Static LCA vs Dynamic LCA

Παράμετρος	Συμβατική	Βιοκλιματική
Static LCA (0,40 σταθερό)	336.000 kg CO ₂	204.000 kg CO ₂
Dynamic LCA	213.360 kg CO ₂	129.540 kg CO ₂
Διαφορά	122.640 kg CO ₂	74.460 kg CO ₂
Υπερεκτίμηση Static	36,5%	36,5%

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 16 προκύπτει ότι η Static LCA υπερεκτιμά τις συνολικές λειτουργικές εκπομπές κατά 36,5% και για τις δύο κατοικίες. Η υπερεκτίμηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η Static LCA χρησιμοποιεί σταθερό συντελεστή εκπομπών 0,40 kg CO₂/kWh για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, αγνοώντας τη σταδιακή μείωση της έντασης άνθρακα του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου λόγω αύξησης της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία της

ενσωμάτωσης της χρονικής διάστασης στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων και τεκμηριώνει την επιλογή της Dynamic LCA ως μεθοδολογικής προσέγγισης της παρούσας έρευνας (Slavkovic & Stephan, 2025· Su et al., 2021).

4.3 Υπολογισμός κόστους κύκλου ζωής (LCC)

Η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost – LCC) εφαρμόζεται με στόχο τη συγκριτική οικονομική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας κατά τη διάρκεια του συνολικού κύκλου ζωής τους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση όχι μόνο του αρχικού κόστους κατασκευής αλλά και των λειτουργικών δαπανών που προκύπτουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας των κατοικιών (Fuller & Petersen, 1996).

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζεται απλοποιημένη προσέγγιση LCC, η οποία περιλαμβάνει το αρχικό κόστος κατασκευής και το λειτουργικό ενεργειακό κόστος των κατοικιών. Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης εξοπλισμού και υπολειμματικής αξίας δεν λαμβάνονται υπόψη, καθώς στόχος της ανάλυσης είναι η συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων κατοικίας υπό κοινές παραδοχές.

Υπολογισμός αρχικού κόστους κατασκευής

- Για τη συμβατική κατοικία:

$$1.700 \text{ €/m}^2 \times 120 \text{ m}^2 = 204.000 \text{ €}$$

- Για τη βιοκλιματική κατοικία:

$$2.000 \text{ €/m}^2 \times 120 \text{ m}^2 = 240.000 \text{ €}$$

Πίνακας 17 Αρχικό κόστος κατασκευής

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Επιφάνεια κατοικίας	120 m ²	120 m ²
Κόστος κατασκευής ανά m ²	1.700 €	2.000 €
Συνολικό αρχικό κόστος	204.000 €	240.000 €

Παρατηρείται ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει αυξημένο αρχικό κόστος κατασκευής κατά:

$$240.000 - 204.000 = 36.000 \text{ €}$$

σε σχέση με τη συμβατική κατοικία.

Υπολογισμός λειτουργικού ενεργειακού κόστους

Με βάση τα αποτελέσματα της ενότητας 4.1:

- Συμβατική κατοικία:

$$16.800 \text{ kWh/έτος} \times 0,20 \text{ €/kWh} = 3.360 \text{ €/έτος}$$

- Βιοκλιματική κατοικία:

$$10.200 \text{ kWh/έτος} \times 0,20 \text{ €/kWh} = 2.040 \text{ €/έτος}$$

Πίνακας 18 Ετήσιο λειτουργικό ενεργειακό κόστος

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας	16.800 kWh	10.200 kWh
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	0,20 €/kWh	0,20 €/kWh
Ετήσιο ενεργειακό κόστος	3.360 €	2.040 €

Η ετήσια εξοικονόμηση κόστους της βιοκλιματικής κατοικίας ανέρχεται σε:

$$3.360 - 2.040 = 1.320 \text{ €/έτος}$$

Υπολογισμός συνολικού ενεργειακού κόστους 50 ετών

- Συμβατική κατοικία:

$$3.360 \text{ €/έτος} \times 50 \text{ έτη} = 168.000 \text{ €}$$

- Βιοκλιματική κατοικία:

$$2.040 \text{ €/έτος} \times 50 \text{ έτη} = 102.000 \text{ €}$$

Πίνακας 19 Συνολικό ενεργειακό κόστος σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Ετήσιο ενεργειακό κόστος	3.360 €	2.040 €
Χρονικός ορίζοντας	50 έτη	50 έτη

Συνολικό ενεργειακό κόστος	168.000 €	102.000 €
Συνολική εξοικονόμηση	-	66.000 €

Υπολογισμός κόστους συντήρησης

- Συμβατική κατοικία: $1.500 \text{ €/έτος} \times 50 \text{ έτη} = 75.000 \text{ €}$
- Βιοκλιματική κατοικία: $1.200 \text{ €/έτος} \times 50 \text{ έτη} = 60.000 \text{ €}$

Συνολικό κόστος κύκλου ζωής

Το συνολικό κόστος κύκλου ζωής υπολογίζεται ως άθροισμα του αρχικού κόστους κατασκευής και του συνολικού ενεργειακού κόστους.

- Συμβατική κατοικία: $204.000 + 168.000 + 75.000 = 447.000 \text{ €}$
- Βιοκλιματική κατοικία: $240.000 + 102.000 + 60.000 = 402.000 \text{ €}$

Πίνακας 20 Συνολικό κόστος κύκλου ζωής (LCC)

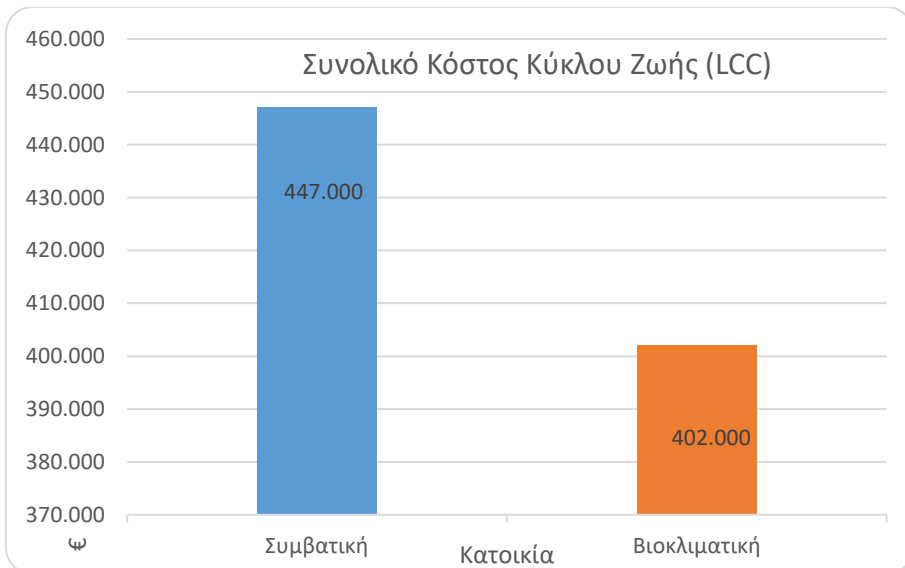
Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Αρχικό κόστος κατασκευής	204.000 €	240.000 €
Συνολικό ενεργειακό κόστος	168.000 €	102.000 €
Συνολικό κόστος συντήρησης	75.000 €	60.000 €
Συνολικό κόστος κύκλου ζωής	447.000 €	402.000 €

Πίνακας 21 Κόστος Κύκλου Ζωής σε Καθαρή Παρούσα Αξία — NPV (discount rate 5%, 50 έτη)

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Αρχικό κόστος κατασκευής	204.000 €	240.000 €
NPV ενεργειακού κόστους	61.340 €	37.242 €

NPV κόστους συντήρησης	27.384 €	21.907 €
Συνολικό NPV κόστους κύκλου ζωής	292.724 €	299.149 €

Από τα αποτελέσματα της ονομαστικής (nominal) ανάλυσης προκύπτει ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει χαμηλότερο συνολικό κόστος κύκλου ζωής κατά 45.000 € σε σχέση με τη συμβατική κατοικία. Ωστόσο, η ανάλυση σε Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV, discount rate 5%) αναδεικνύει μια πιο λεπτή εικόνα: το συνολικό NPV της συμβατικής κατοικίας ανέρχεται σε 292.724 € έναντι 299.149 € της βιοκλιματικής, δηλαδή η βιοκλιματική είναι οριακά υψηλότερη κατά 6.425 €. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μελλοντικά λειτουργικά οφέλη, λόγω της χρονικής αξίας του χρήματος, δεν αντισταθμίζουν πλήρως το υψηλότερο αρχικό κόστος σε NPV όρους. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία της ενσωμάτωσης της προεξόφλησης στις αναλύσεις LCC και υπογραμμίζει ότι η οικονομική υπεροχή της βιοκλιματικής κατοικίας εξαρτάται σημαντικά από το επιλεγμένο επιτόκιο προεξόφλησης και τον χρονικό ορίζοντα αξιολόγησης (Fuller & Petersen, 1996).



Σχήμα 8 Σύγκριση συνολικού κόστους κύκλου ζωής (LCC) των δύο σεναρίων κατοικίας
Πηγή: Ίδια επεξεργασία (Excel)

4.4 Συγκριτική αξιολόγηση συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας

Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέσω της Dynamic LCA και του κόστους κύκλου ζωής

μέσω της LCC, πραγματοποιείται η συγκριτική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας. Η αξιολόγηση βασίζεται σε περιβαλλοντικούς και οικονομικούς δείκτες που επιτρέπουν τη συνολική αποτίμηση της βιωσιμότητας των δύο σεναρίων κατοικίας (Fuller & Petersen, 1996; Klöpffer, 2008).

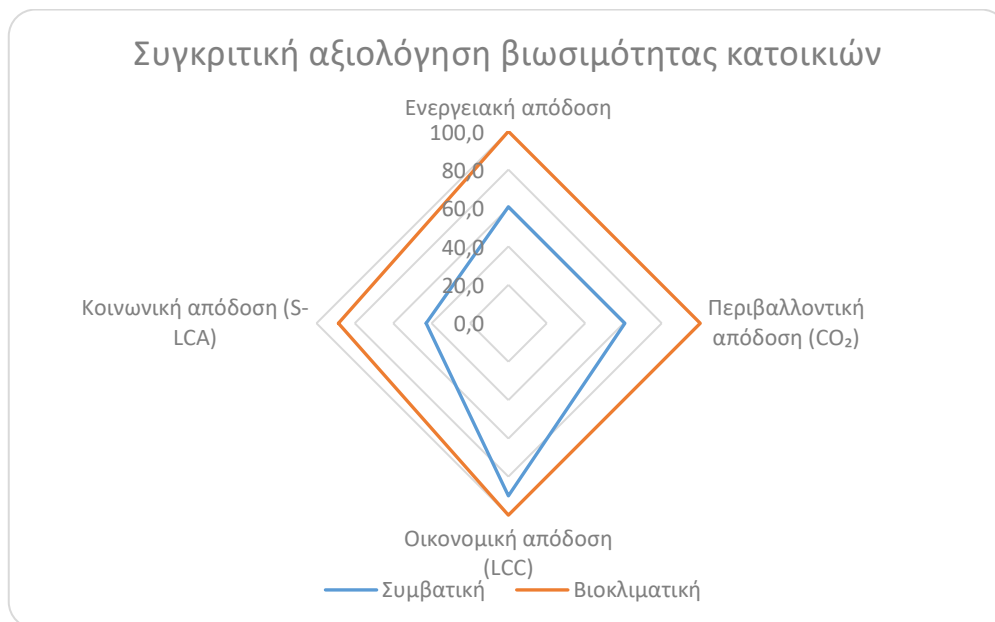
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει σαφώς βελτιωμένη συνολική επίδοση σε σχέση με τη συμβατική κατοικία. Παρότι εμφανίζει υψηλότερο αρχικό κόστος κατασκευής, επιτυγχάνει σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και του συνολικού κόστους κύκλου ζωής.

Πίνακας 22 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Δείκτης	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας	16.800 kWh	10.200 kWh
Συνολική κατανάλωση ενέργειας (50 έτη)	840.000 kWh	510.000 kWh
Συνολικές εκπομπές CO ₂	213.360 kg CO ₂	129.540 kg CO ₂
Μείωση εκπομπών CO ₂	-	83.820 kg CO ₂
Αρχικό κόστος κατασκευής	204.000 €	240.000 €
Συνολικό ενεργειακό κόστος	168.000 €	102.000 €
Συνολικό κόστος συντήρησης	75.000 €	60.000 €
Συνολικό κόστος κύκλου ζωής	447.000 €	402.000 €
Εξοικονόμηση κόστους κύκλου ζωής	-	45.000 €

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 22 αποτυπώνουν τη σαφή υπεροχή της βιοκλιματικής κατοικίας ως προς την ενεργειακή και περιβαλλοντική της επίδοση. Η μείωση της

κατανάλωσης ενέργειας οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση των λειτουργικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και του λειτουργικού κόστους κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου.



Σχήμα 9 Συγκριτική αξιολόγηση βιωσιμότητας συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας (Radar Diagram)

Το Σχήμα 9 παρουσιάζει γραφικά τη συγκριτική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας ως προς βασικούς δείκτες βιωσιμότητας. Παρατηρείται ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μειωμένες εκπομπές CO₂, ενώ εμφανίζει υψηλότερο αρχικό κόστος κατασκευής. Παρά το αυξημένο αρχικό κόστος, η συνολική βιωσιμότητα της βιοκλιματικής κατοικίας είναι σημαντικά βελτιωμένη λόγω της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας και του χαμηλότερου κόστους κύκλου ζωής.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης δείχνουν ότι η εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά τόσο στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και στη βελτίωση της οικονομικής βιωσιμότητας των κατοικιών. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την περιβαλλοντική και οικονομική αποτελεσματικότητα των βιοκλιματικών κτιρίων (UNEP, 2011; Asdrubali et al., 2024).

4.5 Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των δύο κατοικιών πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθοδολογίας Dynamic Life Cycle Assessment (Dynamic LCA), με βασικό δείκτη αξιολόγησης το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential – GWP), το οποίο εκφράζεται σε ισοδύναμα κιλά διοξειδίου του άνθρακα (kg CO₂-eq). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική μεταβολή των συντελεστών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας και την εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος (Slavkovic & Stephan, 2025).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει σημαντικά μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με τη συμβατική κατοικία. Η συνολική λειτουργική κατανάλωση ενέργειας της βιοκλιματικής κατοικίας ανήλθε σε 510.000 kWh για χρονικό ορίζοντα 50 ετών, ενώ η αντίστοιχη κατανάλωση της συμβατικής κατοικίας ανήλθε σε 840.000 kWh.

Η διαφορά αυτή οδήγησε σε σημαντική μείωση των συνολικών λειτουργικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα, οι συνολικές εκπομπές της συμβατικής κατοικίας υπολογίστηκαν σε 213.360 kg CO₂, ενώ οι αντίστοιχες εκπομπές της βιοκλιματικής κατοικίας ανήλθαν σε 129.540 kg CO₂. Συνεπώς, η εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού οδήγησε σε μείωση εκπομπών κατά 83.820 kg CO₂ σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του κτιρίου.

Πίνακας 23 Συνοπτικά αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης

Δείκτης	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Συνολική κατανάλωση ενέργειας	840.000 kWh	510.000 kWh
Συνολικές εκπομπές CO ₂	213.360 kg CO ₂	129.540 kg CO ₂
Μείωση εκπομπών CO ₂	-	83.820 kg CO ₂
Ποσοστό μείωσης εκπομπών	-	39,3%

Η σημαντική αυτή μείωση οφείλεται κυρίως στη βελτιωμένη θερμομονωτική προστασία του κελύφους, στη χρήση ενεργειακά αποδοτικών κουφωμάτων, στην αξιοποίηση φυσικού φωτισμού και αερισμού, καθώς και στην εφαρμογή αποδοτικότερων συστημάτων

θέρμανσης και ψύξης. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τη διεθνή βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία οι βιοκλιματικές και ενεργειακά αποδοτικές κατοικίες παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με τις συμβατικές κατασκευές (Santamouris, 2016; Asdrubali et al., 2024).

Επιπλέον, η εφαρμογή της Dynamic LCA επέτρεψε την ενσωμάτωση της μελλοντικής εξέλιξης του ενεργειακού μίγματος, γεγονός που προσφέρει περισσότερο ρεαλιστική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σύγκριση με τις συμβατικές στατικές προσεγγίσεις. Η σταδιακή αύξηση της συμμετοχής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγεί σε περαιτέρω μείωση των λειτουργικών εκπομπών κατά τη διάρκεια ζωής των κατοικιών (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020; Su et al., 2021).

Συνολικά, τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης αναδεικνύουν τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη της βιοκλιματικής κατοικίας και επιβεβαιώνουν ότι η εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος του κτιριακού τομέα.

4.6 Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης

Η οικονομική αξιολόγηση των δύο κατοικιών πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθοδολογίας Life Cycle Cost (LCC), με στόχο την εκτίμηση του συνολικού κόστους κύκλου ζωής τους σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών. Η ανάλυση περιλαμβάνει το αρχικό κόστος κατασκευής και το λειτουργικό ενεργειακό κόστος, επιτρέποντας τη συγκριτική αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας (Fuller & Petersen, 1996).

Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση LCC περιλαμβάνει το αρχικό κόστος κατασκευής, το λειτουργικό ενεργειακό κόστος και το κόστος συντήρησης των κατοικιών για χρονικό ορίζοντα 50 ετών. Κόστη αντικαταστάσεων εξοπλισμού, υπολειμματικής αξίας και προεξόφλησης μελλοντικών χρηματοροών δεν συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εφαρμογή.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει αυξημένο αρχικό κόστος κατασκευής σε σχέση με τη συμβατική κατοικία. Συγκεκριμένα, το αρχικό κόστος της συμβατικής κατοικίας υπολογίστηκε σε 204.000 €, ενώ το αντίστοιχο κόστος της βιοκλιματικής κατοικίας ανήλθε σε 240.000 €. Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στη χρήση

ενεργειακά αποδοτικών δομικών υλικών, προηγμένων συστημάτων θερμομόνωσης, ενεργειακών κουφωμάτων και τεχνολογιών αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ωστόσο, η αυξημένη αρχική επένδυση αντισταθμίζεται σημαντικά από τη μείωση του λειτουργικού ενεργειακού κόστους. Η συμβατική κατοικία παρουσιάζει συνολικό ενεργειακό κόστος 168.000 € για χρονικό ορίζοντα 50 ετών, ενώ το αντίστοιχο κόστος της βιοκλιματικής κατοικίας περιορίζεται σε 102.000 €. Η διαφορά αυτή αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση 66.000 € υπέρ της βιοκλιματικής κατοικίας.

Πίνακας 24 Συνοπτικά αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης

Δείκτης	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Αρχικό κόστος κατασκευής	204.000 €	240.000 €
Συνολικό ενεργειακό κόστος	168.000 €	102.000 €
Συνολικό κόστος συντήρησης	75.000 €	60.000 €
Συνολικό κόστος κύκλου ζωής	447.000 €	402.000 €
Οικονομικό όφελος	-	45.000 €

Η ανάλυση του συνολικού κόστους κύκλου ζωής έδειξε ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει χαμηλότερο συνολικό κόστος σε σχέση με τη συμβατική κατοικία. Συγκεκριμένα, το συνολικό κόστος κύκλου ζωής της συμβατικής κατοικίας υπολογίστηκε σε 447.000 €, ενώ το αντίστοιχο κόστος της βιοκλιματικής κατοικίας ανήλθε σε 402.000 €.

Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι η αρχική αύξηση του κόστους κατασκευής μπορεί να αποσβεστεί κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης των λειτουργικών δαπανών. Η διαπίστωση αυτή συμφωνεί με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, σύμφωνα με τα οποία οι ενεργειακά αποδοτικές και βιοκλιματικές κατοικίες εμφανίζουν συχνά χαμηλότερο συνολικό κόστος κύκλου ζωής παρά το υψηλότερο αρχικό επενδυτικό κόστος (Fuller & Petersen, 1996; Santamouris, 2016).

Επιπλέον, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών δεν προσφέρει μόνο περιβαλλοντικά οφέλη αλλά και σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα σε μακροχρόνιο ορίζοντα. Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας οδηγεί σε χαμηλότερες λειτουργικές δαπάνες, γεγονός που βελτιώνει τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα της κατοικίας.

Συνολικά, η οικονομική αξιολόγηση επιβεβαιώνει ότι η βιοκλιματική κατοικία αποτελεί οικονομικά αποδοτική επιλογή σε βάθος χρόνου, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κτιριακού τομέα.

4.7 Εφαρμογή της μεθοδολογίας LCSA και συνολική αξιολόγηση βιωσιμότητας

Η συνολική αξιολόγηση βιωσιμότητας των δύο κατοικιών πραγματοποιείται μέσω της μεθοδολογίας Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), η οποία συνδυάζει τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης (Dynamic LCA), της οικονομικής αξιολόγησης (LCC) και της κοινωνικής διάστασης της βιωσιμότητας (Klöpffer, 2008).

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις αλλά και παραμέτρους που σχετίζονται με την ποιότητα διαβίωσης και τη λειτουργική απόδοση των κτιρίων.

Από τα αποτελέσματα της Dynamic LCA προέκυψε ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με τη συμβατική κατοικία. Συγκεκριμένα, η μείωση των συνολικών λειτουργικών εκπομπών ανέρχεται σε 83.820 kg CO₂ κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, γεγονός που αναδεικνύει τη σημαντική περιβαλλοντική συμβολή των βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού.

Παράλληλα, τα αποτελέσματα της LCC έδειξαν ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει χαμηλότερο συνολικό κόστος κύκλου ζωής κατά 45.000 € σε σχέση με τη συμβατική κατοικία, παρά το αυξημένο αρχικό κόστος κατασκευής. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει ότι η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά οφέλη σε μακροχρόνιο ορίζοντα.

Όσον αφορά την κοινωνική διάσταση της βιωσιμότητας, η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω επτά δεικτών S-LCA σε ημιποσοτική κλίμακα 1–5, βάσει του πλαισίου UNEP (2011) και της σχετικής βιβλιογραφίας (Larsen et al., 2022; Bera et al., 2026). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 23α και αναλύονται παρακάτω ανά δείκτη.

Ως προς τη θερμική άνεση, η βιοκλιματική κατοικία επιτυγχάνει βαθμολογία 5/5 έναντι 2/5 της συμβατικής. Αυτό οφείλεται στην αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών όπως η θερμική μάζα, ο φυσικός αερισμός και η ηλιακή προστασία, που μειώνουν σημαντικά τις ακραίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εσωτερικά (Bera et al., 2026; Santamouris, 2016). Αντίστοιχα, ο φυσικός φωτισμός (5/5 έναντι 2/5) και η υγεία και ευημερία χρηστών (5/5 έναντι 2/5) αναδεικνύουν τα σαφή πλεονεκτήματα του βιοκλιματικού σχεδιασμού στη δημιουργία υγιεινών συνθηκών διαβίωσης.

Η ποιότητα εσωτερικού αέρα (IAQ, 4/5 έναντι 2/5) και ο κίνδυνος ενεργειακής φτώχειας (4/5 έναντι 2/5) αποτελούν δείκτες ιδιαίτερης σημασίας στο ελληνικό πλαίσιο. Η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση της βιοκλιματικής κατοικίας μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος, μειώνοντας την έκθεση των νοικοκυριών στον κίνδυνο ενεργειακής φτώχειας, ιδιαίτερα σε συνθήκες αυξημένων τιμών ενέργειας (Larsen et al., 2022; UNEP, 2011). Η ηχομόνωση (4/5 έναντι 3/5) και η προσαρμοστικότητα στην κλιματική αλλαγή (4/5 έναντι 2/5) συμπληρώνουν την εικόνα υπεροχής της βιοκλιματικής κατοικίας, η οποία λόγω της παθητικής της φύσης είναι περισσότερο ανθεκτική σε μελλοντικά κλιματικά σενάρια (Bera et al., 2026; Slavkovic & Stephan, 2025).

Συνολικά, ο μέσος όρος κοινωνικής βαθμολογίας της βιοκλιματικής κατοικίας ανέρχεται σε 4,4/5 έναντι 2,1/5 της συμβατικής, αναδεικνύοντας μια εξαιρετικά σαφή υπεροχή σε όλες τις κοινωνικές διαστάσεις. Παράγοντες αυτοί συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των χρηστών και αποτελούν βασικά στοιχεία της κοινωνικής βιωσιμότητας των κτιρίων (UNEP, 2011).

Πίνακας 25 Σύνθεση αποτελεσμάτων εφαρμογής LCSA

Διάσταση	Δείκτης αξιολόγησης	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία	Υπερέχουσα λύση
Περιβαλλοντική	Συνολικές εκπομπές CO ₂	213.360 kg CO ₂	129.540 kg CO ₂	Βιοκλιματική

Περιβαλλοντική	Κατανάλωση ενέργειας	840.000 kWh	510.000 kWh	Βιοκλιματική
Οικονομική (ονομαστικό LCC)	Κόστος κύκλου ζωής	447.000 €	402.000 €	Βιοκλιματική
Κοινωνική	Θερμική άνεση	Μέτρια	Υψηλή	Βιοκλιματική
Κοινωνική	Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος	Μέτρια	Υψηλή	Βιοκλιματική
Κοινωνική	Φυσικός φωτισμός	Μέτριος	Υψηλός	Βιοκλιματική

Πίνακας 26 Εκτεταμένη αξιολόγηση κοινωνικών δεικτών βάσει S-LCA (κλίμακα 1–5)

Κοινωνικός Δείκτης	Βιβλιογραφική πηγή	Συμβατική (1–5)	Βιοκλιματική (1–5)	Υπερέχουσα λύση
Θερμική άνεση	Bera et al. (2026); Santamouris (2016)	2	5	Βιοκλιματική
Ποιότητα εσωτερικού αέρα (IAQ)	Larsen et al. (2022); UNEP (2011)	2	4	Βιοκλιματική
Φυσικός φωτισμός	Bera et al. (2026); Olgyay (1963)	2	5	Βιοκλιματική
Κίνδυνος ενεργειακής φτώχειας	Larsen et al. (2022); UNEP (2011)	2	4	Βιοκλιματική
Ηχομόνωση / Ακουστική άνεση	Bera et al. (2026); Asdrubali et al. (2024)	3	4	Βιοκλιματική
Υγεία & ευημερία χρηστών	Larsen et al. (2022); Santamouris (2016)	2	5	Βιοκλιματική
Προσαρμοστικότητα στην κλιματική αλλαγή	Bera et al. (2026); Slavkovic & Stephan (2025)	2	4	Βιοκλιματική

Μέσος όρος κοινωνικής βαθμολογίας	—	2,1	4,4	Βιοκλιματική
--	---	------------	------------	---------------------

Σημείωση: Η κλίμακα αξιολόγησης κυμαίνεται από 1 (πολύ χαμηλή επίδοση) έως 5 (πολύ υψηλή επίδοση). Οι βαθμολογίες βασίζονται σε ποιοτική αξιολόγηση βάσει της υφιστάμενης βιβλιογραφίας και των χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων κατοικιών, σύμφωνα με το πλαίσιο S-LCA (UNEP, 2011; Larsen et al., 2022).

Ο Πίνακας 25 αποτελεί τη σύνθεση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας LCSA και συγκεντρώνει τους βασικούς περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς δείκτες που αξιολογήθηκαν στην παρούσα έρευνα. Ο Πίνακας 26 επεκτείνει την κοινωνική διάσταση με επτά επιπλέον δείκτες βάσει S-LCA, αναδεικνύοντας τη συνολική υπεροχή της βιοκλιματικής κατοικίας με μέσο κοινωνικό σκορ 4,4 έναντι 2,1 της συμβατικής. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι η βιοκλιματική κατοικία υπερέχει περιβαλλοντικά και κοινωνικά, ενώ στην οικονομική διάσταση παρουσιάζει χαμηλότερο ονομαστικό κόστος κύκλου ζωής, με την ανάλυση NPV να αναδεικνύει εξάρτηση του αποτελέσματος από τις παραδοχές προεξόφλησης και τιμής ενέργειας.

4.8 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής επίδοσης των κατοικιών. Η συγκριτική αξιολόγηση της συμβατικής και της βιοκλιματικής κατοικίας έδειξε ότι οι παρεμβάσεις που σχετίζονται με τη θερμομόνωση, τα ενεργειακά αποδοτικά κουφώματα, τον φυσικό αερισμό, τον φυσικό φωτισμό και την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγούν σε ουσιαστική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Η εφαρμογή της Dynamic LCA επέτρεψε την αποτύπωση της χρονικής μεταβολής των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τη σταδιακή απανθρακοποίηση του ενεργειακού μίγματος. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει πιο ρεαλιστική εκτίμηση των μελλοντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σύγκριση με τις συμβατικές στατικές μεθόδους αξιολόγησης (Slavkovic & Stephan, 2025). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η

βιοκλιματική κατοικία επιτυγχάνει σημαντική μείωση των λειτουργικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που επιβεβαιώνει τη συμβολή των βιοκλιματικών πρακτικών στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Παράλληλα, η οικονομική αξιολόγηση μέσω της LCC έδειξε ότι το αυξημένο αρχικό κόστος κατασκευής της βιοκλιματικής κατοικίας μπορεί να αντισταθμιστεί από τη μείωση του λειτουργικού ενεργειακού κόστους κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με προηγούμενες μελέτες που αναδεικνύουν τα μακροχρόνια οικονομικά οφέλη των ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων (Fuller & Petersen, 1996; Santamouris, 2016).

Επιπλέον, η εφαρμογή της LCSA κατέδειξε ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει πλεονεκτήματα όχι μόνο ως προς την περιβαλλοντική και οικονομική διάσταση αλλά και ως προς την κοινωνική διάσταση της βιωσιμότητας. Η βελτιωμένη θερμική άνεση, η καλύτερη ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος και η αυξημένη αξιοποίηση φυσικού φωτισμού συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των χρηστών και ενισχύουν τη συνολική βιωσιμότητα των κατοικιών (UNEP, 2011).

Τα αποτελέσματα της έρευνας συμφωνούν με τα συμπεράσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, σύμφωνα με τα οποία οι βιοκλιματικές και ενεργειακά αποδοτικές κατοικίες μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κτιριακού τομέα και στη βελτίωση της αποδοτικότητας των διαθέσιμων πόρων (Asdrubali et al., 2024).

Ωστόσο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης βασίζονται σε συγκεκριμένες παραδοχές σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας, το ενεργειακό μίγμα, το κόστος κατασκευής και τη διάρκεια ζωής των κατοικιών. Επομένως, ενδεχόμενες διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους αυτές ενδέχεται να επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα της αξιολόγησης.

Συνολικά, η έρευνα επιβεβαιώνει ότι η υιοθέτηση βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού αποτελεί αποτελεσματική προσέγγιση για τη βελτίωση της βιωσιμότητας των κατοικιών στην Ελλάδα. Η συνδυασμένη εφαρμογή Dynamic LCA, LCC και LCSA παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης που μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη βιώσιμων κτιρίων.

4.9 Αποτελέσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας

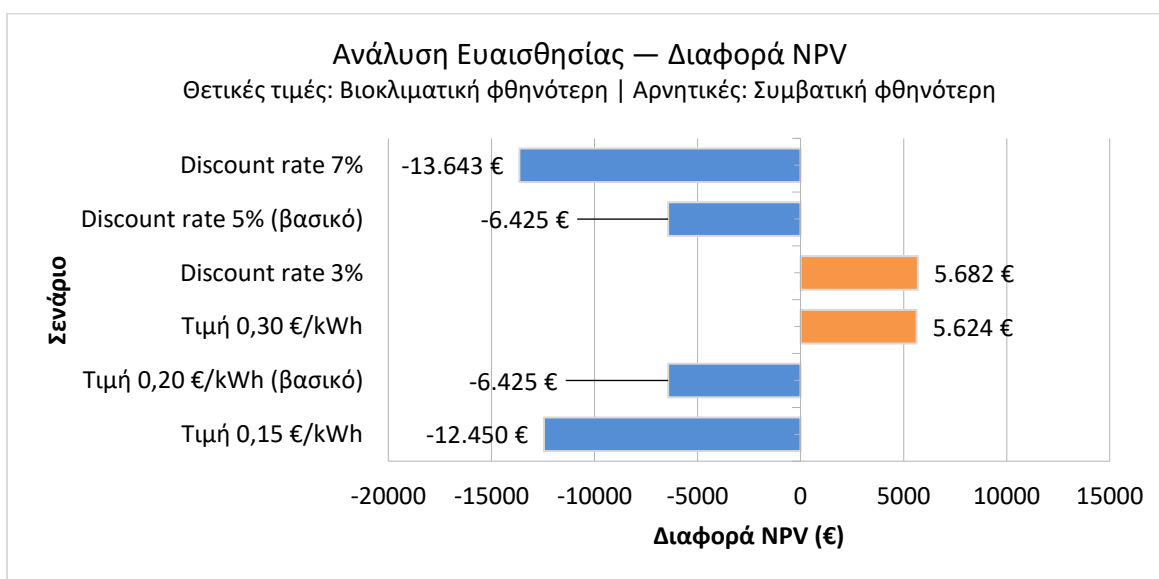
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 27, ο οποίος συγκεντρώνει τις επιπτώσεις των τριών παραμέτρων (τιμή ενέργειας, discount rate, σενάριο αποανθρακοποίησης) στα βασικά αποτελέσματα LCC και Dynamic LCA.

Πίνακας 27 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Παράμετρος	Σενάριο	NPV Συμβατικής	NPV Βιοκλιματικής	Υπερέχουσα λύση
Τιμή ενέργειας	0,15 €/kWh	277.389 €	289.839 €	Συμβατική
Τιμή ενέργειας	0,20 €/kWh (βασικό)	292.724 €	299.149 €	Συμβατική (οριακά)
Τιμή ενέργειας	0,30 €/kWh	323.394 €	317.770 €	Βιοκλιματική
Discount rate	3%	329.047 €	323.364 €	Βιοκλιματική
Discount rate	5% (βασικό)	292.724 €	299.149 €	Συμβατική (οριακά)
Discount rate	7%	271.072 €	284.714 €	Συμβατική
Αποανθρακοποίηση	Αργό σενάριο	268.800 kg CO ₂	163.200 kg CO ₂	Βιοκλιματική
Αποανθρακοποίηση	Βασικό σενάριο	213.360 kg CO ₂	129.540 kg CO ₂	Βιοκλιματική
Αποανθρακοποίηση	Γρήγορο σενάριο	169.680 kg CO ₂	103.020 kg CO ₂	Βιοκλιματική

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας αναδεικνύουν σημαντικά ευρήματα. Ως προς την τιμή ενέργειας, η περιβαλλοντική υπεροχή της βιοκλιματικής κατοικίας παραμένει σταθερή σε όλα τα σενάρια, ενώ η οικονομική υπεροχή σε NPV όρους εξαρτάται κρίσιμα από την τιμή ενέργειας: στο χαμηλό σενάριο (0,15 €/kWh) υπερέχει η συμβατική, ενώ στο υψηλό (0,30 €/kWh) αντιστρέφεται το αποτέλεσμα υπέρ της βιοκλιματικής κατά 5.624 €. Ως προς το discount rate, χαμηλότερα επιτόκια ευνοούν τη βιοκλιματική κατοικία (στο 3% υπερέχει κατά 5.682 €), ενώ υψηλότερα επιτόκια ευνοούν τη συμβατική. Τέλος, η περιβαλλοντική υπεροχή της βιοκλιματικής κατοικίας παραμένει ισχυρή και στα τρία σενάρια αποανθρακοποίησης, με εξοικονόμηση εκπομπών που κυμαίνεται από 66.660 kg CO₂ (γρήγορο) έως 105.600 kg CO₂ (αργό) (Beloïn-Saint-Pierre et al., 2020; Fuller & Petersen, 1996).

Συνολικά, η ανάλυση ευαισθησίας επιβεβαιώνει την ευστάθεια των κύριων περιβαλλοντικών συμπερασμάτων: η βιοκλιματική κατοικία υπερέχει περιβαλλοντικά σε όλα ανεξαιρέτως τα σενάρια. Ωστόσο, η οικονομική υπεροχή σε NPV όρους είναι ευαίσθητη στις παραδοχές, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της διαφάνειας στις παραδοχές των μελετών LCC.



Σχήμα 10 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας — Διαφορά NPV

5. Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση μίας συμβατικής και μίας βιοκλιματικής κατοικίας στην Ελλάδα μέσω της εφαρμογής της Δυναμικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Dynamic Life Cycle Assessment – Dynamic LCA), της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost – LCC) και της Ανάλυσης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA). Η έρευνα επικεντρώθηκε στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων των δύο τύπων κατοικιών σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών, με στόχο τη διερεύνηση της συμβολής των βιοκλιματικών στρατηγικών στη βελτίωση της συνολικής βιωσιμότητας των κτιρίων.

Τα αποτελέσματα της Dynamic LCA έδειξαν ότι η βιοκλιματική κατοικία παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μειωμένες λειτουργικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τη συμβατική κατοικία. Συγκεκριμένα, η συνολική λειτουργική κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε κατά 39,3%, ενώ οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μειώθηκαν κατά 83.820 kg CO₂ κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών και συμφωνούν με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τα πλεονεκτήματα της Dynamic LCA στον κτιριακό τομέα (Slavkovic & Stephan, 2025; Su et al., 2021).

Η οικονομική αξιολόγηση μέσω της μεθοδολογίας LCC έδειξε ότι, παρά το υψηλότερο αρχικό κόστος κατασκευής της βιοκλιματικής κατοικίας, η ονομαστική (nominal) ανάλυση αναδεικνύει οικονομικό όφελος 45.000 € υπέρ της βιοκλιματικής (402.000 € έναντι 447.000 €). Ωστόσο, η ανάλυση σε Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV, discount rate 5%) αναδεικνύει πιο σύνθετη εικόνα: το NPV της συμβατικής ανέρχεται σε 292.724 € έναντι 299.149 € της βιοκλιματικής, δηλαδή η βιοκλιματική είναι οριακά υψηλότερη κατά 6.425 €. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της επιλογής μεθόδου οικονομικής αξιολόγησης και της διαφάνειας στις παραδοχές, και επιβεβαιώνει ότι η οικονομική βιωσιμότητα της βιοκλιματικής κατοικίας εξαρτάται κρίσιμα από το επιτόκιο προεξόφλησης και την τιμή ενέργειας (Fuller & Petersen, 1996).

Η εφαρμογή της LCSA επέτρεψε την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της βιωσιμότητας των δύο κατοικιών, συνδυάζοντας περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς δείκτες όπως αποτυπώνεται στους Πίνακες 25 και 26. Η εκτεταμένη αξιολόγηση της κοινωνικής διάστασης μέσω επτά δεικτών S-LCA (θερμική άνεση, ποιότητα εσωτερικού αέρα, φυσικός φωτισμός, ενεργειακή φτώχεια, ηχομόνωση, υγεία και ευημερία, προσαρμοστικότητα στην κλιματική αλλαγή) ανέδειξε μέσο κοινωνικό σκορ 4,4/5 για τη βιοκλιματική έναντι 2,1/5 για τη συμβατική κατοικία. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη σημασία της ολοκληρωμένης προσέγγισης LCSA για την αξιολόγηση κτιριακών έργων (Klöppfer, 2008; UNEP, 2011; Larsen et al., 2022). Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας που διενεργήθηκε ως προς τρεις κρίσιμες παραμέτρους (τιμή ενέργειας, discount rate, ρυθμός αποανθρακοποίησης) επιβεβαίωσε την ευστάθεια των περιβαλλοντικών συμπερασμάτων: η βιοκλιματική κατοικία υπερέχει περιβαλλοντικά σε όλα ανεξαιρέτως τα σενάρια, με εξοικονόμηση εκπομπών 66.660–105.600 kg CO₂ ανάλογα με τον ρυθμό αποανθρακοποίησης. Η οικονομική υπεροχή σε NPV όρους εξαρτάται από τις παραδοχές: ευνοεί τη βιοκλιματική κατοικία σε σενάρια χαμηλού discount rate (3%) ή υψηλής τιμής ενέργειας (0,30 €/kWh), ενώ ευνοεί τη συμβατική σε υψηλό discount rate (7%) ή χαμηλή τιμή ενέργειας (0,15 €/kWh) (Fuller & Petersen, 1996; Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Η εφαρμογή της Dynamic LCA ανέδειξε τη σημασία της χρονικής διάστασης στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων. Η παραδοσιακή στατική LCA θεωρεί σταθερούς τους συντελεστές εκπομπών καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, ενώ στην πραγματικότητα το ενεργειακό μίγμα μεταβάλλεται διαχρονικά λόγω της αυξανόμενης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της σταδιακής απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού δικτύου. Για τον λόγο αυτό η Dynamic LCA παρέχει πιο ρεαλιστική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατοικιών σε βάθος χρόνου.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών Dynamic LCA και LCSA κατέδειξε ότι η βιοκλιματική κατοικία υπερέχει συνολικά έναντι της συμβατικής. Η Dynamic LCA ανέδειξε τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO₂, ενώ η LCSA επέτρεψε την ταυτόχρονη αξιολόγηση περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η συνδυαστική εφαρμογή

των δύο μεθοδολογιών παρείχε μια περισσότερο ολοκληρωμένη και αξιόπιστη αποτίμηση της συνολικής βιωσιμότητας των εξεταζόμενων κατοικιών.

Συνολικά, η παρούσα έρευνα καταδεικνύει ότι η βιοκλιματική κατοικία αποτελεί την πλέον βιώσιμη επιλογή σε σύγκριση με τη συμβατική κατοικία από περιβαλλοντική και κοινωνική άποψη σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, ενώ από οικονομική άποψη η υπεροχή της εξαρτάται από τις παραδοχές προεξόφλησης και τιμής ενέργειας, όπως ανέδειξε η ανάλυση ευαισθησίας. Η εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών σχεδιασμού μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των χρηστών, υποστηρίζοντας παράλληλα τη μετάβαση προς έναν περισσότερο βιώσιμο κτιριακό τομέα στην Ελλάδα.

5.2 Περιορισμοί της έρευνας

Παρότι η παρούσα έρευνα παρέχει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση συγκριτικής αξιολόγησης συμβατικής και βιοκλιματικής κατοικίας μέσω των μεθοδολογιών Dynamic LCA, LCC και LCSA, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Αρχικά, η μελέτη βασίστηκε σε βιβλιογραφικά δεδομένα και σε συγκεκριμένες παραδοχές σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση, τα δομικά χαρακτηριστικά των κατοικιών, τους συντελεστές εκπομπών και τα οικονομικά δεδομένα. Ως εκ τούτου, ενδεχόμενες διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους αυτές θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα της αξιολόγησης.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά τη χρήση υπολογιστικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Microsoft Excel. Παρότι το εργαλείο αυτό επέτρεψε την ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου υπολογισμών και τη διεξαγωγή της συγκριτικής αξιολόγησης, δεν διαθέτει το εύρος και την πολυπλοκότητα εξειδικευμένων λογισμικών περιβαλλοντικής αξιολόγησης, όπως το SimaPro ή το OpenLCA.

Επιπλέον, η εφαρμογή της Dynamic LCA βασίστηκε σε υποθετικό σενάριο σταδιακής απανθρακοποίησης του ενεργειακού μίγματος. Η πραγματική εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος ενδέχεται να διαφοροποιηθεί στο μέλλον, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τις πραγματικές εκπομπές των κατοικιών κατά τη διάρκεια ζωής τους.

Παράλληλα, η κοινωνική διάσταση της LCSA αξιολογήθηκε μέσω ημιποσοτικής προσέγγισης με επτά δείκτες S-LCA σε κλίμακα 1–5, βάσει της υφιστάμενης βιβλιογραφίας. Αν και η προσέγγιση αυτή αποτελεί βελτίωση σε σχέση με αμιγώς ποιοτικές αξιολογήσεις, δεν υποκαθιστά πλήρη ποσοτική S-LCA βασισμένη σε πρωτογενή δεδομένα. Η περαιτέρω ανάπτυξη τυποποιημένων ποσοτικών κοινωνικών δεικτών στον κτιριακό τομέα αποτελεί σημαντικό ερευνητικό πεδίο (UNEP, 2011; Larsen et al., 2022).

Τέλος, η παρούσα έρευνα επικεντρώθηκε σε μία συγκεκριμένη περίπτωση κατοικίας στην Ελλάδα και δεν εξετάζει διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, κλιματικές ζώνες ή εναλλακτικά κατασκευαστικά σενάρια. Συνεπώς, τα αποτελέσματα της μελέτης δεν μπορούν να γενικευθούν πλήρως για το σύνολο του ελληνικού κτιριακού αποθέματος.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η έρευνα παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τα περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη των βιοκλιματικών κατοικιών και συμβάλλει στην κατανόηση της εφαρμογής των μεθοδολογιών Dynamic LCA και LCSA στον ελληνικό κτιριακό τομέα.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη σημασία της εφαρμογής των μεθοδολογιών Dynamic LCA, LCC και LCSA για τη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικών και βιοκλιματικών κατοικιών. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές δυνατότητες περαιτέρω ερευνητικής ανάπτυξης που μπορούν να συμβάλουν στην πληρέστερη κατανόηση της βιωσιμότητας των κτιρίων και στη βελτίωση των υφιστάμενων μεθοδολογικών προσεγγίσεων.

Αρχικά, μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να επεκτείνουν την εφαρμογή της Dynamic LCA σε διαφορετικούς τύπους κτιρίων, όπως πολυκατοικίες, κτίρια γραφείων, τουριστικά καταλύματα και δημόσια κτίρια. Η σύγκριση διαφορετικών κτιριακών χρήσεων θα επέτρεπε την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των βιοκλιματικών στρατηγικών σε ευρύτερο φάσμα εφαρμογών.

Επιπλέον, θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών κλιματικών ζωνών της Ελλάδας στα αποτελέσματα της Dynamic LCA και της LCSA. Η ανάλυση κατοικιών σε περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες θα παρείχε πιο ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με την ενεργειακή συμπεριφορά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κτιρίων.

Μία ακόμη ενδιαφέρουσα κατεύθυνση έρευνας αφορά την αξιοποίηση πραγματικών δεδομένων λειτουργίας κτιρίων και δεδομένων έξυπνων μετρητών ενέργειας. Η χρήση πραγματικών μετρήσεων θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των υπολογισμών και να περιορίσει την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τις θεωρητικές παραδοχές των μοντέλων.

Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω ανάπτυξη της κοινωνικής διάστασης της LCSA μέσω της ενσωμάτωσης ποσοτικοποιημένων κοινωνικών δεικτών. Η ανάπτυξη κατάλληλων δεικτών που σχετίζονται με την υγεία, την ευημερία, την ενεργειακή φτώχεια και την ποιότητα ζωής θα μπορούσε να ενισχύσει σημαντικά την ολοκληρωμένη αξιολόγηση βιωσιμότητας των κτιρίων.

Επιπλέον, μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν τη σύνδεση της Dynamic LCA με τεχνολογίες Building Information Modelling (BIM), επιτρέποντας την αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων και την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων σε πραγματικό χρόνο. Η ενσωμάτωση BIM και Dynamic LCA αποτελεί ένα ταχέως αναπτυσσόμενο ερευνητικό πεδίο με σημαντικές προοπτικές εφαρμογής στον σχεδιασμό βιώσιμων κτιρίων. Επιπλέον, η σύνδεση BIM, Dynamic LCA και LCSA θα μπορούσε να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων ήδη από τα πρώτα στάδια σχεδιασμού των κτιρίων, βελτιώνοντας τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική τους απόδοση.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της συμβολής των αρχών της κυκλικής οικονομίας στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής των κτιρίων. Η ενσωμάτωση πρακτικών επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης και ανάκτησης υλικών μπορεί να συμβάλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και να ενισχύσει περαιτέρω τη βιωσιμότητα των κατασκευών.

Συνολικά, οι παραπάνω προτάσεις μπορούν να συμβάλουν στην περαιτέρω εξέλιξη των μεθοδολογιών αξιολόγησης βιωσιμότητας και να υποστηρίξουν την ανάπτυξη περισσότερο αποδοτικών, ανθεκτικών και βιώσιμων κτιρίων στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

- Arvizu-Piña, V. A., Armendáriz López, J. F., García González, A. A., & Barrera Alarcón, I. G. (2023). An open access online tool for LCA in building's early design stage in the Latin American context: A screening LCA case study for a bioclimatic building. *Energy and Buildings*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113269>
- Asdrubali, F., Fronzetti Colladon, A., Segneri, L., & Gandola, D. M. (2024). LCA and energy efficiency in buildings: Mapping more than twenty years of research. *Energy and Buildings*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114684>
- Bera, M., Das, S., Dutta, S., Nag, P. K., & Roy Choudhury, M. (2026). Progress and challenges of bioclimatic design strategies for enhancing building environmental performance: A systematic review. *Smart and Sustainable Built Environment*, 15(3), 948–990. <https://doi.org/10.1108/SASBE-07-2024-0250>
- Beloin-Saint-Pierre, D., Albers, A., Hélias, A., Tiruta-Barna, L., Fantke, P., Levasseur, A., Benetto, E., Benoist, A., & Collet, P. (2020). Addressing temporal considerations in life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 743, 140700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140700>
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Braulio-Gonzalo, M., Jorge-Ortiz, A., & Bovea, M. D. (2022). How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings? *Environmental Impact Assessment Review*, 95, 106793. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106793>
- European Parliament and Council. (2018). Directive (EU) 2018/844 on the energy performance of buildings (EPBD). Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>

- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinee, J., Heijungs, R., Hellweg, S., & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Flanagan, R., & Jewell, C. (2005). *Whole life appraisal for construction*. Blackwell Publishing.
- Fnaïs, A., Rezgui, Y., Petri, I., Beach, T., Yeung, J., Ghoroghi, A., & Kubicki, S. (2022). The application of life cycle assessment in buildings: Challenges and directions for future research. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(5), 627–654. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02058-5>
- Fuller, S. K., & Petersen, S. R. (1996). *Life-cycle costing manual for the federal energy management program (NIST Handbook 135)*. National Institute of Standards and Technology. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/HB/nbshandbook135.pdf>
- Givoni, B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. John Wiley & Sons.
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 15686-5: Buildings and constructed assets—Service life planning—Part 5: Life-cycle costing*. ISO.
- Klöppfer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 89–95. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>
- Larsen, V. G., Tollin, N., Sattrup, P. A., Birkved, M., & Holmboe, T. (2022). What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment (LCSA). *Journal of Building Engineering*, 50, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104203>
- Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L., & Samson, R. (2010). Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to global warming impact

- assessments. *Environmental Science & Technology*, 44(8), 3169–3174.
<https://doi.org/10.1021/es9030003>
- Odyssee-Mure. (2023). Energy efficiency and consumption indicators for Greece.
<https://www.odyssee-mure.eu/>
- Olgyay, V. (1963). Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism. Princeton University Press.
- Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings—Past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- Slavkovic, K., & Stephan, A. (2025). Dynamic life cycle assessment of buildings and building stocks – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115262>
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2017). Critical review of BIM-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*, 136, 110–120.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>
- Su, S., Li, X., Zhu, Y., & Lin, B. (2021). Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. *Energy and Buildings*, 244, 111009.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111009>
- United Nations Environment Programme. (2011). Towards a life cycle sustainability assessment. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8021>
- Zhang, J. (2025). Analysis of LCA-emergy and carbon emissions in building systems. *Buildings*, 15(2), 151. <https://doi.org/10.3390/buildings15020151>
- Τδρμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών. (2018). Ενεργειακή αποδοτικότητα και ελληνική οικονομία.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2020). Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK). <https://ypeka.gr>
- IEA. (2023). *Greece Energy Policy Review*. International Energy Agency.
<https://www.iea.org/countries/greece>
- ENTSO-E. (2023). *CO₂ emission intensity factors*. <https://www.entsoe.eu>

Παράρτημα Α: Αναλυτικοί υπολογισμοί

Α.1 Υπολογισμός λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας

Η ετήσια λειτουργική κατανάλωση ενέργειας υπολογίστηκε με βάση την επιφάνεια της κατοικίας και τη μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο.

Συμβατική κατοικία

Επιφάνεια κατοικίας = 120 m²

Ετήσια κατανάλωση = 140 kWh/m²·έτος

16.800 kWh/έτος

Βιοκλιματική κατοικία

Επιφάνεια κατοικίας = 120 m²

Ετήσια κατανάλωση = 85 kWh/m²·έτος

10.200 kWh/έτος

Πίνακας 28 Υπολογισμός ετήσιας λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Επιφάνεια κατοικίας	120 m ²	120 m ²
Κατανάλωση ανά m ²	140 kWh/m ²	85 kWh/m ²
Ετήσια κατανάλωση	16.800 kWh	10.200 kWh

Α.2 Υπολογισμός συνολικής κατανάλωσης ενέργειας 50 ετών

Συμβατική κατοικία : 16.800 × 50= 840.000 kWh

Βιοκλιματική κατοικία : 10.200 × 50= 510.000 kWh

Πίνακας 29 Συνολική κατανάλωση ενέργειας σε 50 έτη

Κατοικία	Συνολική κατανάλωση
Συμβατική	840.000 kWh
Βιοκλιματική	510.000 kWh

Α.3 Υπολογισμός Dynamic LCA

Οι συντελεστές εκπομπών που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της Dynamic LCA παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα και βασίζονται στο σενάριο σταδιακής αποανθρακοποίησης του ελληνικού ενεργειακού μίγματος που υιοθετήθηκε στην παρούσα μελέτη.

Πίνακας 30 Συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας

Έτος	Συντελεστής εκπομπών (kg CO ₂ /kWh)
0	0,40
10	0,32
20	0,25
30	0,18
40	0,12
50	0,08

Α.4 Υπολογισμός εκπομπών CO₂ ανά δεκαετία

Πίνακας 31 Εκπομπές CO₂ ανά δεκαετία

Περίοδος	Συντελεστής εκπομπών	Συμβατική κατοικία (kg CO ₂)	Βιοκλιματική κατοικία (kg CO ₂)
0–10 έτη	0,40	67.200	40.800
10–20 έτη	0,32	53.760	32.640
20–30 έτη	0,25	42.000	25.500
30–40 έτη	0,18	30.240	18.360
40–50 έτη	0,12	20.160	12.240
Σύνολο	-	213.360	129.540

A.5 Υπολογισμός κόστους κύκλου ζωής (LCC)

Αρχικό κόστος κατασκευής

- Συμβατική: $1.700 \text{ €/m}^2 \times 120 \text{ m}^2 = 204.000 \text{ €}$
- Βιοκλιματική: $2.000 \text{ €/m}^2 \times 120 \text{ m}^2 = 240.000 \text{ €}$

Ενεργειακό κόστος

- Συμβατική: $16.800 \times 0,20 \times 50 = 168.000 \text{ €}$
- Βιοκλιματική: $10.200 \times 0,20 \times 50 = 102.000 \text{ €}$

Κόστος συντήρησης

- Συμβατική: $1.500 \times 50 = 75.000 \text{ €}$
- Βιοκλιματική: $1.200 \times 50 = 60.000 \text{ €}$

Πίνακας 32 Συνολικό κόστος κύκλου ζωής

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Αρχικό κόστος κατασκευής	204.000 €	240.000 €
Ενεργειακό κόστος	168.000 €	102.000 €
Κόστος συντήρησης	75.000 €	60.000 €
Συνολικό κόστος κύκλου ζωής	447.000 €	402.000 €

A.6 Υπολογισμός NPV Κόστους Κύκλου Ζωής (discount rate 5%)

Παράμετροι υπολογισμού

- Προεξοφλητικό επιτόκιο (r) = 5% = 0,05
- Χρονικός ορίζοντας (n) = 50 έτη

Τύπος Annuity Factor

$$AF = [1 - (1 + r)^{-n}] / r = [1 - (1,05)^{-50}] / 0,05 = [1 - 0,08720] / 0,05 = 0,91280 / 0,05 = 18,2559$$

Υπολογισμός NPV — Συμβατική κατοικία

- Αρχικό κόστος κατασκευής = 204.000 €
 - NPV ενεργειακού κόστους = $3.360 \text{ €/έτος} \times 18,2559 = 61.340 \text{ €}$
($16.800 \text{ kWh} \times 0,20 \text{ €/kWh} = 3.360 \text{ €/έτος}$)
 - NPV κόστους συντήρησης = $1.500 \text{ €/έτος} \times 18,2559 = 27.384 \text{ €}$
- Συνολικό NPV LCC (Συμβατική) = 204.000 + 61.340 + 27.384 = 292.724 €**

Υπολογισμός NPV — Βιοκλιματική κατοικία

- Αρχικό κόστος κατασκευής = 240.000 €
 - NPV ενεργειακού κόστους = $2.040 \text{ €/έτος} \times 18,2559 = 37.242 \text{ €}$
($10.200 \text{ kWh} \times 0,20 \text{ €/kWh} = 2.040 \text{ €/έτος}$)
 - NPV κόστους συντήρησης = $1.200 \text{ €/έτος} \times 18,2559 = 21.907 \text{ €}$
- Συνολικό NPV LCC (Βιοκλιματική) = 240.000 + 37.242 + 21.907 = 299.149 €**

Σύγκριση NPV αποτελεσμάτων

- Διαφορά NPV = $299.149 - 292.724 = 6.425 \text{ €}$ (η βιοκλιματική παρουσιάζει οριακά υψηλότερο NPV κόστος)
- Για σύγκριση, ονομαστική (nominal) ανάλυση χωρίς προεξόφληση:
- Συμβατική 447.000 € - Βιοκλιματική 402.000 € (διαφορά 45.000 € υπέρ βιοκλιματικής).
- Η σημαντική απόκλιση μεταξύ nominal και NPV ανάλυσης αναδεικνύει τη σημασία της χρονικής αξίας του χρήματος στις αξιολογήσεις LCC.

Παράρτημα Β: Δεδομένα και Παραδοχές της Μελέτης

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικά δεδομένα και οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή των μεθοδολογιών Dynamic LCA, LCC και LCSA στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

Πίνακας 33 Βασικές παραδοχές της μελέτης

Παράμετρος	Συμβατική κατοικία	Βιοκλιματική κατοικία
Επιφάνεια κατοικίας	120 m ²	120 m ²
Χρονικός ορίζοντας ανάλυσης	50 έτη	50 έτη
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας	140 kWh/m ² ·έτος	85 kWh/m ² ·έτος
Συνολική ετήσια κατανάλωση	16.800 kWh	10.200 kWh
Κόστος κατασκευής	1.700 €/m ²	2.000 €/m ²
Αρχικό κόστος κατασκευής	204.000 €	240.000 €
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	0,20 €/kWh	0,20 €/kWh
Ετήσιο κόστος συντήρησης	1.500 €	1.200 €

Πίνακας 34 Συντελεστές εκπομπών Dynamic LCA

Έτος	Συντελεστής εκπομπών (kg CO ₂ /kWh)
0	0,40
10	0,32
20	0,25
30	0,18
40	0,12
50	0,08

Πίνακας 35 Βιβλιογραφική προέλευση δεδομένων

Δεδομένο	Πηγή
Ενεργειακή κατανάλωση συμβατικής κατοικίας	Santamouris (2016)
Ενεργειακή κατανάλωση βιοκλιματικής κατοικίας	Asdrubali et al. (2024)
Dynamic LCA και χρονική διάσταση εκπομπών	Beloin-Saint-Pierre et al. (2020)
Dynamic LCA σε κτίρια	Slavkovic & Stephan (2025)
LCC	Fuller & Petersen (1996)
LCSA	Klöpffer (2008)
Κοινωνική διάσταση LCSA	UNEP (2011)

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.