



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (ΣΘΕΤ)

Συστήματα Κινητού και Διάχυτου Υπολογισμού (ΣΔΥ)

Διπλωματική Εργασία

Διαστημική Γεωργία Ακριβείας

Νεραντζής Σ. Ευάγγελος

Επιβλέπων καθηγητής: Αχιλλέας Καμέας

Επιβλέπων καθηγητής: Θεόδωρος Παναγιωτακόπουλος

Πάτρα, Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («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.



Διαστημική Γεωργία Ακριβείας

Νεραντζής Σ. Ευάγγελος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Αχιλλέας Καμέας

Καθηγητής, Ελληνικό Ανοικτό
Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Θεόδωρος Παναγιωτακόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής, , Ελληνικό
Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Πάτρα, Μάιος 2026

Περίληψη

Οι επανδρωμένες αποστολές μεγάλης διάρκειας προς τη Σελήνη και τον Άρη απαιτούν συστήματα παραγωγής τροφής που μπορούν να λειτουργούν με περιορισμένο ανεφοδιασμό, καθυστερημένη επικοινωνία με τη Γη, αυστηρούς περιορισμούς μάζας και ενέργειας, και υψηλή περιβαλλοντική αβεβαιότητα. Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη Διαστημική Γεωργία Ακριβείας ως ενοποιημένη προσέγγιση για την αυτόνομη διαχείριση καλλιεργειών και βιοαναγεννητικών συστημάτων υποστήριξης ζωής σε μελλοντικές πλανητικές εγκαταστάσεις. Η μελέτη βασίζεται σε ανασκόπηση πεδίου εφαρμογής (scoping review), σύμφωνα με το PRISMA-ScR, με τελικό βιβλιογραφικό σώμα 127 συμπεριληφθεισών δημοσιεύσεων, οργανωμένων σε τέσσερις θεματικούς άξονες: διαστημική βιολογία και βιοαναγεννητικά συστήματα υποστήριξης ζωής, διαστημική γεωργία και τεχνολογία, τεχνολογίες γεωργίας ελεγχόμενου περιβάλλοντος, και γενικές ανασκοπήσεις ή στρατηγικοί οδικοί χάρτες.

Η ανάλυση δείχνει ότι τα υφιστάμενα συστήματα έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο σε φυτοθαλάμους, φωτοβιοαντιδραστήρες, καλλιέργεια μικροαλγών και κυανοβακτηρίων, έννοιες ολοκλήρωσης BLSS/ECLSS, παρακολούθηση φυτικής υγείας, AI-based sensing και επίγειες αναλογικές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, η τεκμηρίωση παραμένει άνιση. Πολλά συστήματα έχουν σημαντική πειραματική αξία, αλλά εξακολουθούν να εξαρτώνται από ανθρώπινη ή επίγεια παρέμβαση. Άλλα παρουσιάζουν ισχυρή αισθητηριακή ή βιολογική απόδοση, χωρίς όμως επαρκή αυτόνομη λήψη αποφάσεων, ανοχή σε αστοχίες, ανθεκτική IoST υποδομή σε ακτινοβολία και ολοκληρωμένο έλεγχο μεταξύ βιολογικών, φυσικών και υπολογιστικών επιπέδων.

Για την αντιμετώπιση αυτού του κενού, η εργασία αναπτύσσει συγκριτικό πλαίσιο αξιολόγησης βασισμένο σε έξι κριτήρια: αυτονομία, δυνατότητα αισθητήρων, ολοκλήρωση κλειστού βρόχου, ενεργειακή απόδοση, ανοχή σε αστοχίες και επεκτασιμότητα. Η σύγκριση αυτή οδηγεί στον εντοπισμό έξι τεχνολογικών κενών, τα οποία τεκμηριώνουν την ανάγκη για την προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική. Η αρχιτεκτονική οργανώνεται σε επίπεδα sensing, networking, edge computing και AI decision-making, με εγκάρσιο επίπεδο ανθεκτικότητας, διεπαφή ολοκλήρωσης BLSS/ECLSS, υβριδικό Digital Twin και ιεραρχία αυτονομίας βασισμένη σε επίπεδα εμπιστοσύνης. Στη συνέχεια, η εργασία μεταφέρει την αρχιτεκτονική αυτή σε εννοιολογικό μοντέλο Space Farm, το οποίο περιλαμβάνει βιολογικά

υποσυστήματα, ροές μάζας και δεδομένων, ECLSS buffer και διαδρομή επικύρωσης από προσομοίωση και hardware-in-the-loop έως αναλογικές, LEO και μελλοντικές δοκιμές μερικής βαρύτητας.

Η εργασία καταλήγει ότι η κεντρική πρόκληση δεν είναι η απουσία επιμέρους τεχνολογιών, αλλά η αξιόπιστη ενοποίησή τους σε ένα ανθεκτικό, αυτόνομο και βιολογικά ερμηνεύσιμο σύστημα. Το προτεινόμενο πλαίσιο συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας δομημένης βάσης για τη μελλοντική πειραματική επικύρωση αυτόνομων συστημάτων διαστημικής γεωργίας.

Λέξεις-κλειδιά: Διαστημική Γεωργία Ακριβείας, Διαδίκτυο των Διαστημικών Πραγμάτων, βιοαναγεννητικά συστήματα υποστήριξης ζωής, γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος, τεχνητή νοημοσύνη, διαστημική γεωργία

Abstract

Long-duration human missions to the Moon and Mars require food-production systems that can operate with limited resupply, delayed communication with Earth, constrained mass and energy budgets, and high environmental uncertainty. This thesis investigates Space Precision Agriculture as an integrated approach for autonomous crop and bioregenerative life-support management in future planetary habitats. The study is based on a PRISMA-ScR-guided scoping review with a final bibliographic body of 127 included publications, organised into four thematic axes: space biology and bioregenerative life-support systems, space agriculture and technology, controlled-environment agriculture technologies, and general reviews or strategic roadmaps.

The analysis shows that existing systems have achieved significant progress in plant growth chambers, photobioreactors, microalgae and cyanobacteria cultivation, BLSS/ECLSS integration concepts, plant-health monitoring, AI-based sensing, and terrestrial analogue facilities. However, the evidence remains uneven. Many systems are experimentally valuable but still depend on human or ground-in-the-loop operation. Others demonstrate strong sensing or biological performance, but lack autonomous decision-making, fault tolerance, radiation-resilient IoST infrastructure, and integrated control across biological, physical and computational layers.

To address this gap, the thesis develops a comparative evaluation framework based on six criteria: autonomy, sensing capability, closed-loop integration, energy efficiency, fault tolerance, and scalability. This comparison identifies six technological gaps that motivate the proposed IoST-SPA architecture. The architecture is structured around sensing, networking, edge computing and AI decision-making layers, supported by a cross-cutting resilience layer, BLSS/ECLSS integration interface, hybrid Digital Twin, and confidence-based autonomy hierarchy. The work further translates this architecture into a conceptual Space Farm model, including biological subsystems, mass and data flows, ECLSS buffering, and a staged validation pathway from simulation and hardware-in-the-loop testing to analogue, LEO and future partial-gravity demonstrations.

The thesis concludes that the central challenge is not the absence of individual technologies, but their reliable integration into a resilient, autonomous and biologically meaningful

system. The proposed framework contributes a structured foundation for future experimental validation of autonomous space farming systems.

Keywords: Space Precision Agriculture, Internet of Space Things, bioregenerative life-support systems, controlled-environment agriculture, artificial intelligence, space farming

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	vi
Abstract	viii
Περιεχόμενα	x
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων.....	xiv
Κατάλογος Πινάκων.....	xv
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xvii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Εισαγωγικό Πλαίσιο: Η Επιτακτική Ανάγκη για Διαστημική Γεωργία	1
1.2 Ιστορική Αναδρομή: Η Εξέλιξη της Διαστημικής Γεωργίας.....	2
1.2.1 Τα Πρώτα Βήματα: Σοβιετικά Πειράματα και Πρώιμες Ερευνητικές Προσπάθειες.....	2
1.2.2 Η Αμερικανική Συνεισφορά: Από το CELSS στο Veggie και το APH.....	3
1.2.3 Η Ευρωπαϊκή Διάσταση: MELiSSA και EDEN ISS.....	4
1.2.4 Η Σύγχρονη Εποχή: Αναλογικές Αποστολές και Νέες Τεχνολογικές Συγκλίσεις	4
1.3 Περιγραφή του Προβλήματος	5
1.4 Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας	6
1.4.1 Κύριος Στόχος	6
1.4.2 Επιμέρους Στόχοι (ΕΣ1–ΕΣ7)	6
1.5 Ερευνητικά Ερωτήματα.....	7
1.5.1 Τεχνολογικό Υπόβαθρο και Υφιστάμενες Λύσεις.....	7
1.5.2 Απαιτήσεις και Περιορισμοί.....	7
1.5.3 Αρχιτεκτονική IoST και Αυτονομία	8
1.5.4 Αξιολόγηση και Μελλοντικά Κενά	8
1.6 Δομή της Εργασίας.....	8
1.7 Συμβολή της Εργασίας	9
2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	11
2.1 Επιλογή Μεθοδολογίας	11
2.2 Στρατηγική Αναζήτησης	13
2.2.1 Επιλογή Βάσης Δεδομένων	13
2.2.2 Σχήματα Αναζήτησης και Αποτελέσματα	13
2.3 Αποκλεισμός Διπλότυπων	15
2.4 Κριτήρια Συμπερίληψης και Αποκλεισμού	16
2.5 Διαδικασία Ελέγχου	17
2.5.1 Ροή Εργασίας.....	17
2.5.2 Αποτελέσματα Ελέγχου.....	18
2.6 Κατηγοριοποίηση των Συμπεριληφθέντων Δημοσιεύσεων.....	18
2.7 Περιορισμοί της Μεθοδολογίας	21
3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	22
3.1 Άξονας Α1: Διαστημική Βιολογία και Βιοαναγεννητικά Συστήματα Υποστήριξης Ζωής.....	22
3.1.1 Χαρτογράφηση του Βιβλιογραφικού Σώματος: Οργανισμοί, Προγράμματα και Τάσεις.....	23

3.1.2	Μικροφύκη και Κυανοβακτήρια: Συγκριτική Αξιολόγηση.....	25
3.1.3	Limnospira indica.....	26
3.1.4	Chlorella vulgaris	26
3.1.5	Chroococcidiopsis sp.....	27
3.1.6	Anabaena και Nostoc.....	27
3.1.7	Το Πρόγραμμα MELiSSA: Τεχνολογική Ωριμότητα και Κενά	33
3.1.8	Βιολογική ISRU: Από τη Θεωρία στη Μέτρηση.....	35
3.1.9	Ανθεκτικότητα στις Εξωγήινες Καταπονήσεις.....	40
3.1.10	Ενσωμάτωση BLSS–ECLSS: Η Υβριδική Αναγκαιότητα	41
3.1.11	Μαθηματική Μοντελοποίηση, Ψηφιακοί Δίδυμοι και Αυτόνομος Έλεγχος 42	
3.1.12	Πέντε Κεντρικά Ευρήματα για τον Σχεδιασμό Αυτόνομων Συστημάτων .	43
3.2	Αξονας Α2: Διαστημική Γεωργία και Τεχνολογία — IoST, Τεχνητή Νοημοσύνη και Αυτόνομος Έλεγχος	44
3.2.1	Αρχιτεκτονική IoST και Διαπλανητική Επικοινωνία	45
3.2.2	Πρωτόκολλα επικοινωνίας και ενδιάμεσο λογισμικό	46
3.2.3	Τοπίο πρωτοκόλλων και λειτουργική τοποθέτηση	46
3.2.4	Hardware Πλατφόρμες: Από το Εργαστήριο στον Δορυφόρο.....	47
3.2.5	Συστήματα Αισθητήρων για Παρακολούθηση Καλλιέργειας	48
3.2.6	Τεχνητή Νοημοσύνη, Ψηφιακοί Δίδυμοι και Ανίχνευση Ανωμαλιών	50
3.2.7	Επίγειες Αναλογικές Αποστολές και Επίπεδα Τεχνολογικής Ωριμότητας	54
3.2.8	Τεχνολογικά Κενά και Σύνθεση	55
3.3	Αξονας Α3: Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος και Τεχνολογία — Η Γέφυρα προς το Διάστημα.....	56
3.3.1	Χαρτογράφηση του Βιβλιογραφικού Σώματος: Τεχνολογίες, Εφαρμογές και Επίπεδα Ωριμότητας.....	57
3.3.2	Παρακολούθηση Φωτοβιοαντιδραστήρων: Από τον Αισθητήρα στη Βιολογική Απόφαση.....	57
3.3.3	Αυτοματισμός και Επίπεδα Αυτονομίας.....	58
3.3.4	Αναλυτικό Λογισμικό: ADA ως Εργαλείο Γεφύρωσης	61
3.3.5	Σύνθεση: Η Πιο Μεταφερόμενη Τεχνολογία και οι Τρεις Αναγκαίες Μετατροπές	63
3.4	Αξονας Α4: Ανασκοπήσεις και Γενικές Μελέτες — Η Μνήμη και ο Οδικός Χάρτης του Πεδίου.....	64
3.4.1	Ιστορική Εξέλιξη: Από τη Χλωρέλλα στο Βιο-ISRU.....	64
3.4.2	Τρέχον Τεχνολογικό Επίπεδο: Ωριμο, Αναδυόμενο και Επείγον	65
3.4.3	Κρίσιμα Τεχνολογικά Κενά: Συναίνεση και Διαφοροποιήσεις	70
3.4.4	Αρχές Σχεδιασμού για Ανθεκτικά Συστήματα	71
3.4.5	Αυτονομία: Τρέχουσα Κατάσταση και Απαιτήσεις.....	71
3.4.6	Σύγκριση Περιβάλλοντος: ISS, Σελήνη και Άρης.....	72
3.4.7	Οδικός Χάρτης και Ενοποιημένη Θεώρηση	72
4	Συγκριτική Αξιολόγηση Αρχιτεκτονικών και Τεχνολογικών Κενών	78
4.1	Μεθοδολογία συγκριτικής αξιολόγησης.....	78
4.1.1	Evidence matrix: αντιστοίχιση συστημάτων/τεχνολογιών με το βιβλιογραφικό σώμα.....	80
4.2	Συγκριτική ανάλυση διαστημικών συστημάτων καλλιέργειας.....	81

4.3	Συγκριτική ανάλυση αναλογικών αποστολών και επίγειων δοκιμών.....	83
4.4	Συγκριτική ανάλυση βιοαναγεννητικών συστημάτων και φωτοβιοαντιδραστήρων.....	84
4.5	Συγκριτική ανάλυση AI, IoST, sensing και digital twin αρχιτεκτονικών.....	86
4.6	Σύνθεση ευρημάτων: τι είναι ώριμο, τι είναι ημιώριμο και τι λείπει.....	87
4.7	Περιορισμοί της συγκριτικής μελέτης.....	89
4.8	Από τη σύγκριση στις σχεδιαστικές απαιτήσεις του ζητουμένου SPA	89
4.9	Τεχνολογικά κενά G1–G6 και σύνδεση με τα Κεφάλαια 5–6	90
5	IoST-SPA Αρχιτεκτονική για Διαστημική Γεωργία Ακριβείας	92
5.1	Από το βιβλιογραφικό σώμα στις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις.....	92
5.2	Τεχνικές άγκυρες από το βιβλιογραφικό σώμα	93
5.3	Συνολική IoST-SPA αρχιτεκτονική και ροές δεδομένων	95
5.4	Data Fusion and Validation: από ακατέργαστη μέτρηση σε αξιόπιστο σήμα ...	99
5.5	Networking Layer: από cloud-first παρακολούθηση σε onboard-first επικοινωνία	99
5.6	Από το IoT στο IoST: εννοιολογική μετάβαση	101
5.7	Αρχιτεκτονική δεδομένων και κατηγορίες δεδομένων.....	102
	Μοντέλο δεδομένων, μεταδεδομένα ποιότητας και ιχνηλασιμότητα	102
5.8	Ποιότητα υπηρεσίας, προτεραιοποίηση και πολιτική δεδομένων.....	103
5.9	Επικοινωνία ανθεκτική σε καθυστέρηση Γης–διαστήματος.....	104
5.10	Επικοινωνιακή ασφάλεια και ασφάλεια δεδομένων.....	104
5.11	Παράδειγμα ροής από άκρο σε άκρο.....	105
5.12	Edge Computing και Digital Twin: τοπική επεξεργασία και expected-state control.....	106
5.13	AI Decision Layer: από επιμέρους AI τεχνικές σε confidence-based autonomy	107
5.14	Ιεραρχία αποφάσεων L1–L4.....	108
5.15	Σχέση L1–L4 και R1–R4.....	109
5.16	BLSS Integration Interface: μετατροπή βιολογικών κύκλων σε IoST κόμβους	109
5.17	Resilience Layers: από anomaly detection σε αρχιτεκτονική ανθεκτικότητας	111
5.18	Περιορισμοί της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής	112
6	Εννοιολογικό Μοντέλο Space Farm	113
6.1	Ρόλος και όρια του εννοιολογικού μοντέλου Space Farm.....	113
6.2	Φυσική και λογική διάταξη του Space Farm.....	114
6.3	Βιολογική παραγωγική στρατηγική και χαρτοφυλάκιο οργανισμών.....	116
6.4	Κύκλοι λειτουργίας και σχέση πληρώματος-συστήματος.....	117
6.5	Υβριδικό Digital Twin και λειτουργική χρήση του στο Space Farm	119
6.6	Σενάρια αστοχίας και fallback strategies.....	120
6.7	Ενεργειακή και πόρων διαχείριση	121
6.8	Διαδρομή επικύρωσης: SiL, HiL, αναλογική δοκιμή και διαστημική επίδειξη.....	122
6.9	Ολοκληρωμένη σύνθεση	124
7	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	126
7.1	Κύρια συμπεράσματα της εργασίας	126
7.2	Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα.....	128
7.3	Συνεισφορά της εργασίας.....	129
7.3.1	Θεωρητική συνεισφορά.....	129

7.3.2	Πρακτική συνεισφορά	130
7.3.3	Περιορισμοί της εργασίας	130
7.4	Κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας	131
7.5	Τελική αποτίμηση.....	133
Βιβλιογραφία.....		134
1	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	143

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 2-1 Διάγραμμα ροής επιλογής μελετών (PRISMA-ScR)	12
Εικόνα 2-2 Κατανομή των 127 συμπεριληφθέντων δημοσιεύσεων ανά τύπο δημοσίευσης	20
Εικόνα 5-1 Ροές δεδομένων, απόφασης και ελέγχου στην προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική	96
Εικόνα 5-2 Προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική ως τετραεπίπεδο εννοιολογικό πλαίσιο με εγκάρσια ανθεκτικότητα	97
Εικόνα 5-3 Προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική ως εννοιολογικό πλαίσιο	98
Εικόνα 6-1 Εννοιολογική φυσική και λογική διάταξη Space Farm. Το μοντέλο διαχωρίζει ζώνες φυτικής καλλιέργειας, PBR/BLSS κόμβους, ECLSS εφεδρεία, ρομποτική/actuation, edge/digital twin και ανθρώπινη ή επίγεια εποπτεία.....	115
Εικόνα 6-2 Υποσυστήματα Space Farm, ρόλος και βιβλιογραφική τεκμηρίωση	115

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Σχήματα Αναζήτησης και Αποτελέσματα Αναζήτησης στη Scopus	15
Πίνακας 2-2 Κριτήρια Συμπερίληψης και Αποκλεισμού	17
Πίνακας 2-3 Ανάλυση Αποκλεισθέντων Δημοσιεύσεων ανά Κριτήριο.....	18
Πίνακας 2-4 Κατανομή Συμπεριληφθέντων Δημοσιεύσεων ανά Θεματικό Άξονα	19
Πίνακας 2-5 Κατανομή ανά Τύπο Δημοσίευσης	19
Πίνακας 2-6 Χρονική Κατανομή Συμπεριληφθέντων Δημοσιεύσεων.....	20
Πίνακας 3-1 Κυανοβακτηριακά στελέχη για βιο-ISRU στον Άρη και υποστήριξη ζωής....	30
Πίνακας 3-2 Μικροοργανισμοί και βιοτεχνολογικές εφαρμογές για διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής.	32
Πίνακας 3-3 Διατροφικό προφίλ και άμεσα οφέλη υγείας επιλεγμένων ειδών μικροφυκών	33
Πίνακας 3-4 Κύρια στοιχεία και λειτουργικές απαιτήσεις BLSS	35
Πίνακας 3-5 Ενδεικτικοί δείκτες απόδοσης σε βιοαναγεννητικά συστήματα και ανάκτηση πόρων.....	40
Πίνακας 3-6 Αντιστοίχιση πρωτοκόλλων και λειτουργιών για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική IoST-SPA.....	47
Πίνακας 3-7 Αυτόνομες τεχνολογίες διαστημικής γεωργίας και κύρια κενά.	54
Πίνακας 3-8 TRL και διαστημική εφαρμοσιμότητα επιλεγμένων BLSS τεχνολογιών	68
Πίνακας 3-9 Στρατηγικές διαστημικής γεωργίας και βιοενίσχυση πρότυπων καλλιεργειών	70
Πίνακας 3-10 Συγκριτική αποτύπωση των τεσσάρων θεματικών αξόνων	74
Πίνακας 3-11 Συνοπτική αποτύπωση ερευνητικών κενών και μελλοντικών κατευθύνσεων.....	77
Πίνακας 4-1 Πλαίσιο κριτηρίων αξιολόγησης με σαφείς βαθμίδες ποιοτικής αξιολόγησης C1–C6	80
Πίνακας 4-2 Evidence matrix του Κεφαλαίου 4	81
Πίνακας 4-3 Συγκριτική αξιολόγηση διαστημικών συστημάτων καλλιέργειας ως προφίλ C1–C6	82
Πίνακας 4-4 Συγκριτική αξιολόγηση αναλογικών αποστολών και επίγειων δοκιμαστηρίων	84
Πίνακας 4-5 Συγκριτική αξιολόγηση BLSS/PBR συστημάτων ως προφίλ C1–C6.....	85
Πίνακας 4-6 Σύγκριση AI/IoST/Digital Twin αρχιτεκτονικών ως προς C1–C6	87
Πίνακας 4-7 Συνολική σύνθεση ωριμότητας τεχνολογιών	89
Πίνακας 4-8 Σχεδιαστικές απαιτήσεις ζητούμενου SPA που προκύπτουν από τη συγκριτική αξιολόγηση	90
Πίνακας 4-9 Τεχνολογικά κενά G1–G6 και τεκμηρίωση από το βιβλιογραφικό σώμα	91
Πίνακας 5-1 Αντιστοίχιση τεχνολογικών κενών με αρχιτεκτονικές απαιτήσεις και τεκμηρίωση από το βιβλιογραφικό σώμα	93
Πίνακας 5-2 Τεχνικές άγκυρες από το βιβλιογραφικό σώμα και αξιοποίησή τους στην προτεινόμενη SPA αρχιτεκτονική.....	95
Πίνακας 5-3 Αισθητηριακές και ενεργοποιητικές κατηγορίες που τεκμηριώνονται στο βιβλιογραφικό σώμα.....	99
Πίνακας 5-4 Πρωτόκολλα, δικτυακές πρακτικές και αξιοποίηση στο Networking Layer	100

Πίνακας 5-5 Λειτουργική αντιστοίχιση επίγειου IoT και IoST-SPA	101
Πίνακας 5-6 Κατηγορίες δεδομένων και τρόπος διαχείρισης στην αρχιτεκτονική IoST-SPA.	102
Πίνακας 5-7 Ελάχιστο λογικό μοντέλο δεδομένων για παρατηρήσεις IoST-SPA.....	103
Πίνακας 5-8 Συνοπτική αποτύπωση ερευνητικών κενών και μελλοντικών κατευθύνσεων.	104
Πίνακας 5-9 Ελάχιστες λειτουργίες ασφάλειας επικοινωνιών/δεδομένων για το IoST-SPA.	105
Πίνακας 5-10 Τεχνικές επεξεργασίας και μοντελοποίησης στο Edge Computing και Digital Twin Layer	107
Πίνακας 5-11 AI τεχνικές από το βιβλιογραφικό σώμα και ρόλος τους στο AI Decision Layer	108
Πίνακας 5-12 AI τεχνικές από το βιβλιογραφικό σώμα και ρόλος τους στο AI Decision Layer	109
Πίνακας 5-13 BLSS υποσυστήματα, ροές μάζας και μεταφορά τους σε IoST-addressable κόμβους.....	111
Πίνακας 5-14 Επίπεδα ανθεκτικότητας R1–R4 και ενέργειες ανάκαμψης	111
Πίνακας 6-1 Αντιστοίχιση κενών G1–G6 με λειτουργικά στοιχεία του Space Farm	114
Πίνακας 6-2 Μοντέλο παραγωγής του Space Farm	117
Πίνακας 6-3 Κύκλοι λειτουργίας και σχέση L-layer/R-layer. Οι καθημερινές ενέργειες εκτελούνται κυρίως onboard, ενώ το resilience layer διατηρεί δικαίωμα override σε κρίσιμες αστοχίες.	118
Πίνακας 6-4 Κύκλοι λειτουργίας, επίπεδα αυτονομίας και ρόλος πληρώματος.....	119
Πίνακας 6-5 Υβριδική δομή Digital Twin για Space Farm	119
Πίνακας 6-6 Σενάρια αστοχίας και στρατηγικές fallback του Space Farm.....	121
Πίνακας 6-7 Ενεργειακές μεταβλητές σχεδιασμού και απαιτήσεις επικύρωσης	122
Πίνακας 6-8 Προτεινόμενη διαδρομή επικύρωσης του Space Farm. Η SiL/HiL προσέγγιση προηγείται της αναλογικής και διαστημικής δοκιμής, ώστε να ελεγχθούν decisions, actuators, resilience και crew workflow πριν από ακριβότερη επικύρωση	123
Πίνακας 6-9 Στάδια επικύρωσης Space Farm και μετρικές ελέγχου.....	124
Πίνακας 6-10 Τελική σύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου Space Farm.....	125
Πίνακας 7-1 Συνθετική αποτύπωση των κύριων συμπερασμάτων	128
Πίνακας 7-2 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα και σύνδεση με τα κεφάλαια.....	129
Πίνακας 7-4 Προτεινόμενες κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας.	132

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Ακρωνύμιο	Πλήρης όρος	Ελληνική απόδοση / χρήση στην εργασία
ADA	Algal Data Analysis	Πλατφόρμα ανάλυσης δεδομένων φωτοβιοαντιδραστήρων
AI	Artificial Intelligence	Τεχνητή Νοημοσύνη
AI/ML	Artificial Intelligence / Machine Learning	Τεχνητή Νοημοσύνη / Μηχανική Μάθηση
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System	Προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμού
APH	Advanced Plant Habitat	Προηγμένος θάλαμος φυτικής ανάπτυξης στον ISS
Artemis	Artemis Program	Πρόγραμμα Artemis της NASA
BLSS	Bioregenerative Life Support System	Βιοαναγεννητικό σύστημα υποστήριξης ζωής
BLSS/ECLSS	Bioregenerative / Environmental Control and Life Support System	Σύνδεση βιοαναγεννητικών και φυσικοχημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής
Bio-ISRU	Biological In-Situ Resource Utilization	Βιολογική αξιοποίηση επιτόπιων πόρων
BIOS-3	BIOS-3 Closed Ecological System	Σοβιετικό/ρωσικό κλειστό οικολογικό σύστημα υποστήριξης ζωής
BPC	Biomass Production Chamber	Θάλαμος παραγωγής βιομάζας
C1–C6	Criteria 1–6	Κριτήρια συγκριτικής αξιολόγησης
CEA	Controlled Environment Agriculture	Γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος
CEEF	Closed Ecology Experiment Facility	Κλειστή πειραματική οικολογική εγκατάσταση
CELSS	Controlled Ecological Life Support System	Ελεγχόμενο οικολογικό σύστημα υποστήριξης ζωής
CDRA	Carbon Dioxide Removal Assembly	Μονάδα απομάκρυνσης διοξειδίου του άνθρακα
COD	Chemical Oxygen Demand	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο
CSTR	Continuous Stirred-Tank Reactor	Συνεχώς αναδευόμενος αντιδραστήρας
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής
DNA	Deoxyribonucleic Acid	Δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ
DTN	Delay-Tolerant Networking	Δικτύωση ανθεκτική σε καθυστέρηση
ECLSS	Environmental Control and Life Support System	Σύστημα περιβαλλοντικού ελέγχου και υποστήριξης ζωής
EDEN ISS	EDEN ISS Greenhouse Project	Αναλογικό θερμοκήπιο EDEN ISS
EC	Electrical Conductivity	Ηλεκτρική αγωγιμότητα
EDTA	Ethylenediaminetetraacetic Acid	Χηλικός παράγοντας EDTA
ESM	Equivalent System Mass	Ισοδύναμη μάζα συστήματος

Ακρωνύμιο	Πλήρης όρος	Ελληνική απόδοση / χρήση στην εργασία
ESA / ΕΟΔ	European Space Agency	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος
FaRLiP	Far-Red Light Photoacclimation	Φωτοεγκλιματισμός σε άπω ερυθρό φως
FCM	Flow Cytometry	Κυτταρομετρία ροής
G1–G6	Gaps 1–6	Τεχνολογικά κενά που εντοπίζονται στο Κεφάλαιο 4
HiL	Hardware-in-the-Loop	Επικύρωση με πραγματικό υλικό στον βρόχο
HI-SEAS	Hawai‘i Space Exploration Analog and Simulation	Αναλογική αποστολή προσομοίωσης διαστημικής απομόνωσης
IoST	Internet of Space Things	Διαδίκτυο των Διαστημικών Πραγμάτων
IoT	Internet of Things	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
ISRU	In-Situ Resource Utilization	Αξιοποίηση επιτόπιων πόρων
ISS	International Space Station	Διεθνής Διαστημικός Σταθμός
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	Ιαπωνική Υπηρεσία Αεροδιαστημικής Εξερεύνησης
KSC	Kennedy Space Center	Διαστημικό Κέντρο Kennedy
L1–L4	Autonomy Levels 1–4	Επίπεδα αυτονομίας απόφασης
LEO	Low Earth Orbit	Χαμηλή γήινη τροχιά
LED	Light-Emitting Diode	Δίοδος εκπομπής φωτός
LSS	Life Support System	Σύστημα υποστήριξης ζωής
MABR	Membrane-Aerated Biofilm Reactor	Βιοαντιδραστήρας βιοϋμενίου με αερισμό μέσω μεμβράνης
MARL	Multi-Agent Reinforcement Learning	Πολυπρακτορική ενισχυτική μάθηση
MEC	Microbial Electrochemical Cell / Microbial Electrolysis Cell	Μικροβιακό ηλεκτροχημικό/ηλεκτρολυτικό κελί
MELiSSA	Micro-Ecological Life Support System Alternative	Μικρο-οικολογικό εναλλακτικό σύστημα υποστήριξης ζωής
MFA	Metabolic Flux Analysis	Ανάλυση μεταβολικής ροής
MFU	Medium Filtration Unit	Μονάδα φιλτραρίσματος μέσου καλλιέργειας
MGS-1	Mars Global Simulant 1	Προσομοίωμα αρείκου ρεγόλιθου
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος των ΗΠΑ
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης
NFT	Nutrient Film Technique	Τεχνική θρεπτικού υμενίου
OGA	Oxygen Generation Assembly	Μονάδα παραγωγής οξυγόνου
PBR	Photobioreactor	Φωτοβιοαντιδραστήρας
PCC	Pasteur Culture Collection	Κωδικός στελέχους κυανοβακτηρίων / συλλογής καλλιεργειών

Ακρωνύμιο	Πλήρης όρος	Ελληνική απόδοση / χρήση στην εργασία
PFD	Photon Flux Density	Πυκνότητα ροής φωτονίων
PTNDS	Porous-Tube Nutrient Delivery System	Σύστημα παροχής θρεπτικών μέσω πορώδους σωλήνα
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability, Supportability	Αξιοπιστία, διαθεσιμότητα, συντηρησιμότητα και υποστηριξιμότητα
RNA	Ribonucleic Acid	Ριβονουκλεϊκό οξύ
R1–R4	Resilience Layers 1–4	Επίπεδα ανθεκτικότητας
RMSE	Root Mean Square Error	Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος
SAM	Space Analog for the Moon and Mars	Αναλογική εγκατάσταση Σελήνης και Άρη
SCO	Single-Cell Oil	Έλαιο μονοκυτταρικών οργανισμών
SiL	Software-in-the-Loop	Επικύρωση λογισμικού στον βρόχο
SOD	Superoxide Dismutase	Υπεροξειδική δισμουτάση
SPA	Space Precision Agriculture	Διαστημική Γεωργία Ακριβείας
SRA	Sabatier Reactor Assembly	Αντιδραστήρας Sabatier
SVT	Science Verification Test	Δοκιμή επιστημονικής επαλήθευσης
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol	Πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης / πρωτόκολλο διαδικτύου
TID	Total Ionizing Dose	Συνολική ιονίζουσα δόση
TRL	Technology Readiness Level	Επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας
UV	Ultraviolet	Υπεριώδης ακτινοβολία
UV-A	Ultraviolet A	Υπεριώδης ακτινοβολία Α
UV-B	Ultraviolet B	Υπεριώδης ακτινοβολία Β
UV-C / UVC	Ultraviolet C	Υπεριώδης ακτινοβολία C
VEGGIE	Vegetable Production System	Σύστημα παραγωγής λαχανικών στον ISS
VNIR	Visible and Near-Infrared	Ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα
VOCs	Volatile Organic Compounds	Πτητικές οργανικές ενώσεις
XAI	Explainable Artificial Intelligence	Εξηγήσιμη Τεχνητή Νοημοσύνη

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο 21ος αιώνας σηματοδοτεί μια νέα εποχή για την ανθρώπινη διαστημική εξερεύνηση. Τα προγράμματα Artemis της NASA [1], τα σχέδια μόνιμης εγκατάστασης στη Σελήνη μέσω του Lunar Gateway[2], η φιλοδοξία της ESA για αποστολές προς τον Άρη[3], και τα ιδιωτικά εγχειρήματα όπως αυτά της SpaceX αναδιαμορφώνουν ριζικά την ανθρώπινη σχέση με το διάστημα [4]. Η προοπτική επανδρωμένων αποστολών μεγάλης διάρκειας οι οποίες μπορούν να εκτείνονται από μήνες μέχρι και χρόνια, θέτει ένα θεμελιώδες και επιτακτικό ερώτημα: *πώς θα τρέφεται το πλήρωμα αυτόνομα, μακριά από τη Γη, χωρίς να εξαρτάται από διαρκείς ανεφοδιασμούς που κοστίζουν εκατομμύρια δολάρια ανά κιλό;*

1.1 Εισαγωγικό Πλαίσιο: Η Επιτακτική Ανάγκη για Διαστημική Γεωργία

Η απάντηση στο ερώτημα αυτό έγκειται στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων παραγωγής τροφής εντός του ίδιου του διαστημικού σκάφους ή της πλανητικής βάσης. Η Διαστημική Γεωργία δηλαδή η επιστήμη και η τεχνολογία καλλιέργειας φυτών και μικροοργανισμών σε διαστημικές ή πλανητικές εγκαταστάσεις, δεν αποτελεί πλέον απλώς ερευνητική περιέργεια, αλλά κρίσιμη τεχνολογική προϋπόθεση για τη βιωσιμότητα των μελλοντικών αποστολών. Σύμφωνα με την ανασκόπηση των ερευνητικών προγραμμάτων της NASA, ένα αυτόνομο βιοαναγεννητικό σύστημα υποστήριξης ζωής που ενσωματώνει καλλιέργεια φυτών και μικροφυκών μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος ανεφοδιασμού αποστολών μεγάλης διάρκειας [5].

Οι ρόλοι που καλείται να επιτελέσει η διαστημική καλλιέργεια είναι πολλαπλοί και αλληλένδετοι. Παρέχει φρέσκια τροφή με υψηλή θρεπτική αξία, αναπληρώνοντας βιταμίνες και ιχνοστοιχεία. Μέσω της φωτοσύνθεσης, απορροφά διοξείδιο του άνθρακα και παράγει οξυγόνο, συμβάλλοντας στη ρύθμιση της ατμόσφαιρας της μονάδας διαβίωσης. Μέσω βιοαντιδραστήρων μικροφυκών όπως η *Spirulina* και η *Chlorella*, καθίσταται δυνατή η ανακύκλωση αποβλήτων και η παραγωγή βιομάζας υψηλής πρωτεΐνης. Τέλος, η παρουσία πρασίνου σε ένα κλειστό χώρο διαβίωσης έχει αποδεδειγμένα θετική επίδραση στην ψυχολογική κατάσταση των αστροναυτών [6], [7], [8], [9].

Ωστόσο, η υλοποίηση βιώσιμων συστημάτων διαστημικής καλλιέργειας απαιτεί την υπέρβαση εξαιρετικά απαιτητικών τεχνολογικών, βιολογικών και λειτουργικών

προκλήσεων. Η μικροβαρύτητα επηρεάζει άμεσα την κίνηση του νερού, τον γεωτροπισμό των φυτών και τη ροή θρεπτικών συστατικών. Η κοσμική ακτινοβολία απειλεί τόσο τους βιολογικούς ιστούς όσο και τα ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης. Οι περιορισμοί μάζας, όγκου και ενέργειας υπαγορεύουν αρχιτεκτονικές ελάχιστου αποτυπώματος. Τέλος, η καθυστερημένη επικοινωνία με τη Γη καθιστά αναγκαία την υψηλού βαθμού αυτονομία στη λήψη αποφάσεων.

Είναι ακριβώς αυτές οι προκλήσεις που καθιστούν αναπόσπαστη τη σύγκλιση τριών τεχνολογικών τομέων: του Διαδικτύου των Διαστημικών Πραγμάτων (IoST), που επεκτείνει τις αρχές του διάχυτου υπολογισμού στο διαστημικό περιβάλλον· της Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης (AI/ML), που επιτρέπουν αυτόνομη λήψη αποφάσεων και προβλεπτικό έλεγχο· και της ρομποτικής, που αναλαμβάνει εργασίες συντήρησης, φροντίδας και συγκομιδής χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη σύνθεση αυτών των τριών πυλώνων σε ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό πλαίσιο Διαστημικής Γεωργίας Ακριβείας (Space Precision Agriculture).

1.2 Ιστορική Αναδρομή: Η Εξέλιξη της Διαστημικής Γεωργίας

1.2.1 Τα Πρώτα Βήματα: Σοβιετικά Πειράματα και Πρώιμες Ερευνητικές Προσπάθειες

Η ιδέα της καλλιέργειας φυτών στο διάστημα γεννήθηκε παράλληλα με τις πρώτες επανδρωμένες αποστολές της δεκαετίας του 1960. Οι Σοβιετικοί επιστήμονες, αναγνωρίζοντας νωρίς τη σημασία της αυτονομίας για μακροχρόνιες αποστολές, ξεκίνησαν πειραματισμούς με απλές υδροπονικές διατάξεις ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Το σύστημα Oasis-1A στον σταθμό Salyut-1, και αργότερα τα συστήματα Fiton και Vazon, αποτέλεσαν τις πρώτες αποδείξεις ότι η φυτική ανάπτυξη στη μικροβαρύτητα είναι εφικτή. Η φυτική βιολογία σε αυτές τις πρώιμες αποστολές παρουσίαζε σημαντικές αποκλίσεις από τα γήινα πρότυπα, αποκαλύπτοντας έτσι τη βαθύτερη επίδραση της μικροβαρύτητας στη φυσιολογία των φυτών [10].

Η πιο σημαντική ρωσική συνεισφορά ήταν το σύστημα Lada, που εγκαταστάθηκε στον ISS το 2002. ο Lada εγκαταστάθηκε στο ρωσικό τμήμα του ISS το 2002 και χρησιμοποιήθηκε

σε διαδοχικά πειράματα φυτικής ανάπτυξης, μεταξύ άλλων με μπιζέλι και άλλα είδη. Η ποικιλία σιταριού USU-Arogee είχε προηγουμένως μελετηθεί στο θερμοκήπιο Svet του σταθμού Mir. Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν αποτελούν μοναδική πηγή πληροφοριών για τη μακροχρόνια φυτική ανάπτυξη σε μικροβαρύτητα, αναδεικνύοντας την ανάγκη για ελεγχόμενα συστήματα παρακολούθησης υγρασίας και θρεπτικών συστατικών σε πραγματικό χρόνο [11].

1.2.2 Η Αμερικανική Συνεισφορά: Από το CELSS στο Veggie και το APH

Παράλληλα με τις σοβιετικές και μετέπειτα ρωσικές προσπάθειες, η NASA ανέπτυξε τη θεωρητική βάση για τα Controlled Ecological Life Support Systems (CELSS) από τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Σύμφωνα με τους MacElroy et al., το πρόγραμμα CELSS έθεσε τις αρχές για ένα ολοκληρωμένο κλειστό οικοσύστημα που θα μπορούσε να υποστηρίξει ανθρώπινη ζωή σε μακροχρόνιες αποστολές, ενσωματώνοντας καλλιέργεια φυτών, ανακύκλωση νερού, παραγωγή οξυγόνου και διαχείριση αποβλήτων σε έναν ενιαίο κύκλο [12].

Η πρακτική υλοποίηση αυτής της φιλοσοφίας εκδηλώθηκε με το σύστημα VEGGIE (Vegetable Production System), που εγκαταστάθηκε στον ISS τον Μάιο του 2014. Το VEGGIE χρησιμοποιεί ειδικά σχεδιασμένα υποστρώματα ανάπτυξης ριζών (plant pillows), φωτισμό LED με ρυθμιζόμενο φάσμα που συνδυάζει κόκκινο, μπλε και πράσινο φως, και υδροπονική άρδευση. Μέχρι σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο σύστημα στο διάστημα για τη μελέτη παραγωγής φρέσκιας τροφής, ενώ κατά τη διάρκεια των πρώτων χρόνων λειτουργίας του αστροναύτες κατανάλωσαν μαρούλι, πιπεριές και ραπάνια καλλιεργημένα αποκλειστικά στο διάστημα [13].

Η επόμενη γενιά αντιπροσωπεύεται από το Advanced Plant Habitat (APH), που ενεργοποιήθηκε στον ISS το 2018 και εγκαταστάθηκε στο Columbus/US Lab module. Το APH αποτελεί τομή στον αυτοματισμό της διαστημικής καλλιέργειας: ενσωματώνει περισσότερους από 180 αισθητήρες που παρακολουθούν ταυτόχρονα θερμοκρασία, υγρασία, CO₂, εθυλένιο, φωτισμό και την κατάσταση του υποστρώματος. Σύμφωνα με τους Monje et al., το APH είναι ένα πλήρως κλειστό, κλειστού βρόχου σύστημα που λειτουργεί σε μεγάλο βαθμό αυτόνομα, επικοινωνώντας συνεχώς με την επίγεια ομάδα ελέγχου του NASA Kennedy Space Center.

1.2.3 Η Ευρωπαϊκή Διάσταση: MELiSSA και EDEN ISS

Η Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA) ακολούθησε μια διαφορετική φιλοσοφία, επικεντρώνοντας τις προσπάθειές της σε ολοκληρωμένα βιοαναγεννητικά συστήματα. Το πρόγραμμα MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), που ξεκίνησε το 1989 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα ως κοινοπραξία 30 ευρωπαϊκών οργανισμών, αντιπροσωπεύει το πιο φιλόδοξο εγχείρημα δημιουργίας ενός τεχνητού αυτοσυντηρούμενου οικοσυστήματος για διαστημικές εφαρμογές. Το MELiSSA είναι οργανωμένο ως ένα κλειστό βιολογικό κύκλωμα πέντε διαμερισμάτων: αναερόβια βακτήρια αποδομούν τα οργανικά απόβλητα του πληρώματος· φωτοοξειδωτικά βακτήρια μετατρέπουν τα προϊόντα αποδόμησης σε ανόργανες ενώσεις· μικροφύκη (κυρίως *Limnospira indica*) παράγουν οξυγόνο και βιομάζα· ανώτερα φυτά παράγουν τροφή· και το ίδιο το πλήρωμα κλείνει τον κύκλο. Σύμφωνα με τους Lasseur et al., το MELiSSA αποτελεί την πιο μακροχρόνια BLSS πρωτοβουλία παγκοσμίως και την πρώτη που προσέγγισε το πρόβλημα από μηχανολογική σκοπιά [14].

Ενδεικτική της ευρωπαϊκής τεχνολογικής ωριμότητας είναι το πρόγραμμα EDEN ISS του Γερμανικού Κέντρου Αεροδιαστημικής, που υλοποιήθηκε στην Ανταρκτική μεταξύ 2018 και 2023, ένα εξαιρετικά ρεαλιστικό ανάλογο διαστημικής βάσης. Σύμφωνα με τους Zabel et al., κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης λειτουργίας (2018) παράχθηκαν πάνω από 268 κιλά εδώδιμης βιομάζας από 26 διαφορετικές καλλιέργειες στα 12,5 m² της εγκατάστασης, αποδεικνύοντας την πρακτική βιωσιμότητα της τεχνολογίας. Η παρακολούθηση της υγείας των φυτών πραγματοποιήθηκε μέσω εξελιγμένου αυτοματοποιημένου συστήματος αισθητήρων και υπολογιστικής όρασης [8].

1.2.4 Η Σύγχρονη Εποχή: Αναλογικές Αποστολές και Νέες Τεχνολογικές Συγκλίσεις

Η δεκαετία του 2020 χαρακτηρίζεται από μια διπλή επιτάχυνση: αφενός, αύξηση των μακροχρόνιων αναλογικών αποστολών που προσομοιώνουν πλανητικές βάσεις, και αφετέρου, ραγδαία πρόοδος στις τεχνολογίες AI, IoST και ρομποτικής. Το πρόγραμμα CHAPEA (Crew Health and Performance Exploration Analog) της NASA, που διεξάγεται στο «Mars Dune Alpha», ένα 3D-εκτυπωμένο habitat στο Johnson Space Center, μελετά όλες τις πτυχές της ανθρώπινης ζωής σε αποστολές προς τον Άρη, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής τροφής. Παράλληλα, νέα ερευνητικά έργα εξερευνούν τη χρήση μικροφυκών για εφαρμογές πέρα από τη βασική διατροφή, παραγωγή βιοκαυσίμων,

φαρμακευτικών ουσιών και βιοπλαστικών, ενώ η πρόοδος στους αλγορίθμους υπολογιστικής όρασης για τη διάγνωση ασθενειών φυτών δημιουργεί νέες δυνατότητες για πλήρως αυτόνομη λειτουργία διαστημικών θερμοκηπίων.[9]

1.3 Περιγραφή του Προβλήματος

Παρά τις εντυπωσιακές επιτυχίες που καταγράφηκαν στην ιστορική αναδρομή, η ανάλυση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας αποκαλύπτει ένα κρίσιμο κενό: δεν υπάρχει σήμερα ένα ενιαίο, ολοκληρωμένο πλαίσιο Διαστημικής Γεωργίας Ακριβείας που να συνδυάζει συστηματικά και αρχιτεκτονικά όλες τις σχετικές τεχνολογίες σε ένα λειτουργικό σύνολο. Τα υπάρχοντα συστήματα, όσο εξελιγμένα και αν είναι μεμονωμένα, αντιμετωπίζουν σημαντικές αδυναμίες ως προς την αυτονομία, την ανθεκτικότητα και την ολιστική ενσωμάτωσή τους.

Η πρώτη και σημαντικότερη αδυναμία είναι η εξάρτηση από επίγειο έλεγχο. Τα περισσότερα υπάρχοντα συστήματα, όπως το APH, λειτουργούν με συνεχή παρέμβαση των επίγειων ομάδων. Σε αποστολές προς τον Άρη, όπου η καθυστέρηση επικοινωνίας φτάνει τα 4–24 λεπτά, ο άμεσος επίγειος έλεγχος καθίσταται αδύνατος. Ένα σύστημα που δεν μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις αυτόνομα, να αντιδρά στην ασθένεια ενός φυτού, στη βλάβη ενός αισθητήρα, ή στην ανεπάρκεια θεραπευτικών συστατικών, δεν είναι κατάλληλο για αποστολές μεγάλης διάρκειας.

Η δεύτερη αδυναμία είναι η απουσία ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής IoST. Τα υπάρχοντα συστήματα χρησιμοποιούν αισθητήρες και δίκτυα επικοινωνίας σχεδιασμένα για γήινες εφαρμογές, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του διαστημικού περιβάλλοντος, ανθεκτικότητα σε ακτινοβολία, περιορισμοί ισχύος, ανάγκη για υπολογιστική αιχμής λόγω περιορισμένης επικοινωνίας κ.ά. Δεν υπάρχει συστηματικά ορισμένη IoST αρχιτεκτονική ειδικά για διαστημικές αγρο-εφαρμογές που να ορίζει τα επίπεδα αισθητήρων, δικτύωσης, υπολογιστικής αιχμής και λήψης αποφάσεων μέσω τεχνητής νοημοσύνης

Η τρίτη αδυναμία είναι το κενό στη συγκριτική αξιολόγηση. Παρά τον μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων στο πεδίο, δεν υπάρχει ένα συστηματικό πλαίσιο σύγκρισης που να αξιολογεί τα υπάρχοντα συστήματα με κοινές μετρικές αυτονομίας, ανθεκτικότητας, ενεργειακής απόδοσης και βιολογικής αποτελεσματικότητας. Αυτή η ελλειμματική

συγκριτική ανάλυση καθιστά δύσκολο τον εντοπισμό βέλτιστων πρακτικών και τεχνολογικών κενών.

Συνοψίζοντας, το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η παρούσα εργασία είναι η απουσία ενός ολοκληρωμένου θεωρητικού πλαισίου Διαστημικής Γεωργίας Ακριβείας, το οποίο θα: (α) καταγράφει συστηματικά τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς των διαστημικών συστημάτων καλλιέργειας, (β) αξιολογεί συγκριτικά τις υπάρχουσες λύσεις, (γ) ορίζει μια ειδικά σχεδιασμένη IoST αρχιτεκτονική για διαστημικές εφαρμογές, και (δ) παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο εννοιολογικό μοντέλο αυτόνομου διαστημικού θερμοκηπίου.

1.4 Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

1.4.1 Κύριος Στόχος

Ο κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου θεωρητικού πλαισίου Διαστημικής Γεωργίας Ακριβείας που αξιοποιεί τις τεχνολογίες Internet of Space Things (IoST), Τεχνητής Νοημοσύνης/Μηχανικής Μάθησης (AI/ML) και ρομποτικής για τη δημιουργία αυτόνομων διαστημικών θερμοκηπίων, ικανών να υποστηρίξουν επανδρωμένες αποστολές μακράς διάρκειας και μόνιμες πλανητικές βάσεις. Για την καλύτερη ανάπτυξη της εργασίας ο κύριος στόχος αναλύθηκε σε 7 επιμέρους στόχους

1.4.2 Επιμέρους Στόχοι (ΕΣ1–ΕΣ7)

Ο ΕΣ1 αφορά την καταγραφή των απαιτήσεων, περιορισμών και κινδύνων των διαστημικών συστημάτων καλλιέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τις μοναδικές συνθήκες του διαστημικού περιβάλλοντος.

Ο ΕΣ2 συνίσταται στη συγκριτική επισκόπηση των υπαρχουσών ερευνητικών προσπαθειών και τεχνολογικών λύσεων από NASA, ESA, DLR, JAXA και Roscosmos, με έμφαση στα πειράματα ISS, τις αναλογικές αποστολές, τα βιοαναγεννητικά συστήματα και τα ρομποτικά πρωτότυπα.

Ο ΕΣ3 καθορίζει τις τεχνολογικές, βιολογικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την καλλιέργεια φυτών και μικροφυκών στο διάστημα, δημιουργώντας πλαίσιο κατανόησης των κρίσιμων παραγόντων επιτυχίας.

Ο ΕΣ4 αξιολογεί τις διαθέσιμες τεχνολογίες αισθητήρων, συστημάτων IoST, ρομποτικής και ελεγκτών περιβάλλοντος κατάλληλων για χρήση σε διαστημικές εφαρμογές.

Ο ΕΣ5 αφορά τον αναλυτικό σχεδιασμό ενός IoST stack σε τέσσερα επίπεδα: αισθητήρων, δικτύωσης, υπολογιστικής αιχμής και λήψης αποφάσεων μέσω τεχνητής νοημοσύνης.

Ο ΕΣ6 συνίσταται στη σχεδίαση εννοιολογικού μοντέλου διαστημικού θερμοκηπίου που ενσωματώνει φυσική διάταξη, ροές δεδομένων, επίπεδα αυτονομίας και μηχανισμούς ανθεκτικότητας.

Ο ΕΣ7 έχει ως σκοπό τον εντοπισμό τεχνολογικών κενών στην υπάρχουσα έρευνα και τη διατύπωση συγκεκριμένων προτάσεων μελλοντικής έρευνας.

1.5 Ερευνητικά Ερωτήματα

Βάσει των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 1.3 και των στόχων της Ενότητας 1.4, η παρούσα εργασία αναπτύσσεται γύρω από εννέα ερευνητικά ερωτήματα σε τέσσερις θεματικές ενότητες.

1.5.1 Τεχνολογικό Υπόβαθρο και Υφιστάμενες Λύσεις

EE1: Ποιες είναι οι κύριες τεχνολογικές λύσεις — αισθητήρες, LED, υδροπονία που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πειράματα στον ISS (π.χ. Veggie, APH) και σε αποστολές σε επίγειο περιβάλλον (π.χ. EDEN ISS);

EE2: Ποιος είναι ο ρόλος των μικροφυκών και των Φωτοβιοαντιδραστήρων στη δημιουργία κλειστών συστημάτων υποστήριξης ζωής;

EE3: Ποιες ρομποτικές εφαρμογές και συστήματα αυτοματισμού έχουν δοκιμαστεί για τη συντήρηση και συγκομιδή καλλιεργειών σε συνθήκες μικροβαρύτητας ή πλανητικών βάσεων;

1.5.2 Απαιτήσεις και Περιορισμοί

EE4: Ποιες είναι οι κρίσιμες περιβαλλοντικές και βιολογικές παράμετροι, CO₂, ακτινοβολία, μικροβαρύτητα, που διαφοροποιούν τη Διαστημική Γεωργία από τη Γεωργία Ακριβείας στη Γη;

EE5: Ποιες είναι οι μη-λειτουργικές απαιτήσεις — περιορισμοί μάζας, όγκου, ενέργειας και ανθεκτικότητας σε ακτινοβολία — για την εγκατάσταση ενός IoST stack στο διάστημα;

1.5.3 Αρχιτεκτονική IoST και Αυτονομία

EE6: Πώς μπορεί να δομηθεί μια αρχιτεκτονική επιπέδων, sensing, networking, edge, AI, για να εξασφαλίσει αυτόνομη λήψη αποφάσεων σε συνθήκες περιορισμένης επικοινωνίας με τη Γη;

EE7: Ποιοι αλγόριθμοι AI/ML είναι καταλληλότεροι για την πρόβλεψη προβλημάτων, όπως ασθένειες φυτών και βλάβες εξοπλισμού, καθώς και για τη βελτιστοποίηση της παροχής θρεπτικών συστατικών σε κλειστά οικοσυστήματα;

1.5.4 Αξιολόγηση και Μελλοντικά Κενά

EE8: Ποιος είναι ο βαθμός αυτονομίας των υφιστάμενων συστημάτων και πού εντοπίζονται τα κυριότερα τεχνολογικά κενά για τη μετάβαση σε πλήρως αυτόνομες διαστημικές φάρμες;

EE9: Ποιες στρατηγικές ανθεκτικότητας (resilience layers) και μηχανισμοί ανάκαμψης από αστοχίες υλικού κρίνονται απαραίτητοι για τη βιωσιμότητα μιας διαστημικής βάσης που βασίζεται σε αυτόνομα συστήματα καλλιέργειας;

1.6 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια. Το παρόν Κεφάλαιο 1 έχει θέσει το πλαίσιο, την προβληματική, τους στόχους, τα ερευνητικά ερωτήματα και τη δομή, παρέχοντας επίσης ιστορική αναδρομή από τη δεκαετία του 1960 μέχρι σήμερα.

Το Κεφάλαιο 2 «Μεθοδολογία Έρευνας» παρουσιάζει τη μεθοδολογία της ανασκόπησης πεδίου εφαρμογής σύμφωνα με το PRISMA-ScR, τη στρατηγική αναζήτησης, τη διαδικασία αφαίρεσης διπλοτύπων, τα κριτήρια συμπερίληψης και αποκλεισμού, τη διαδικασία ελέγχου και την κατηγοριοποίηση των 127 συμπεριληφθεισών δημοσιεύσεων.

Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τη συνθετική βιβλιογραφική ανασκόπηση του τελικού βιβλιογραφικού σώματος των 127 συμπεριληφθεισών δημοσιεύσεων. Η ανάλυση οργανώνεται σε τέσσερις άξονες: A1 — Διαστημική Βιολογία και Βιοαναγεννητικά Συστήματα Υποστήριξης Ζωής, A2 — Διαστημική Γεωργία και Τεχνολογία, A3 — Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος και Τεχνολογία, και A4 — Ανασκοπήσεις και Γενικές Μελέτες. Το κεφάλαιο δεν λειτουργεί ως απλός κατάλογος άρθρων, αλλά ως

σύνθεση των τεχνολογιών, των περιορισμών και των ερευνητικών κενών που οδηγούν στη συγκριτική αξιολόγηση του Κεφαλαίου 4.

Το Κεφάλαιο 4 μετατρέπει τα ευρήματα της βιβλιογραφικής σύνθεσης σε συγκριτικό πλαίσιο αξιολόγησης. Χρησιμοποιεί τα κριτήρια C1–C6 για να αποτιμήσει υφιστάμενες κατηγορίες συστημάτων, όπως ISS/LEO συστήματα καλλιέργειας, αναλογικές αποστολές, BLSS/PBR υποσυστήματα και AI/IoST αρχιτεκτονικές. Από αυτή τη σύγκριση προκύπτουν τα τεχνολογικά κενά G1–G6, τα οποία λειτουργούν ως γέφυρα προς την προτεινόμενη αρχιτεκτονική.

Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει την προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική ως τετραεπίπεδο εννοιολογικό πλαίσιο: sensing, networking, edge computing και AI decision-making. Η αρχιτεκτονική ενσωματώνει BLSS/ECLSS interface, υβριδικό Digital Twin, confidence-based επίπεδα αυτονομίας L1–L4 και εγκάρσιο επίπεδο ανθεκτικότητας. Με αυτόν τον τρόπο απαντά στα κενά G1–G6 που αναδείχθηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Το Κεφάλαιο 6 μεταφέρει την αρχιτεκτονική του Κεφαλαίου 5 σε λειτουργικό εννοιολογικό μοντέλο Space Farm. Περιγράφει τη φυσική διάταξη, το βιολογικό χαρτοφυλάκιο, τις ροές μάζας και δεδομένων, το ECLSS buffer, τη χρήση ESM ως μετρικής αξιολόγησης και τη διαδρομή επικύρωσης μέσω SiL, HiL, αναλογικών δοκιμών, ISS/LEO demonstration και μελλοντικών δοκιμών σε μερική βαρύτητα.

Το Κεφάλαιο 7 συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα, απαντά συγκεντρωτικά στα ερευνητικά ερωτήματα, αποτιμά τη θεωρητική και πρακτική συνεισφορά καθώς και τους περιορισμούς της εργασίας, και διατυπώνει κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας.

Τα ερευνητικά ερωτήματα δεν περιορίζονται στην καταγραφή υπαρχουσών τεχνολογιών. Οργανώνουν τη μετάβαση από τη βιβλιογραφική χαρτογράφηση προς την αρχιτεκτονική σύνθεση: πρώτα εξετάζεται τι έχει ήδη τεκμηριωθεί στο βιβλιογραφικό σώμα, στη συνέχεια αξιολογείται ποια κενά παραμένουν, και τέλος διερευνάται πώς μπορεί να σχεδιαστεί ένα ενιαίο IoST-SPA πλαίσιο για αυτόνομη διαστημική γεωργία.

1.7 Συμβολή της Εργασίας

Η συμβολή της εργασίας εντοπίζεται σε έξι σημεία. Πρώτον, οργανώνει το τελικό βιβλιογραφικό σώμα των 127 συμπεριληφθεισών δημοσιεύσεων σε τέσσερις αναλυτικούς άξονες. Δεύτερον, μετατρέπει τη βιβλιογραφική σύνθεση σε συγκριτικό πλαίσιο

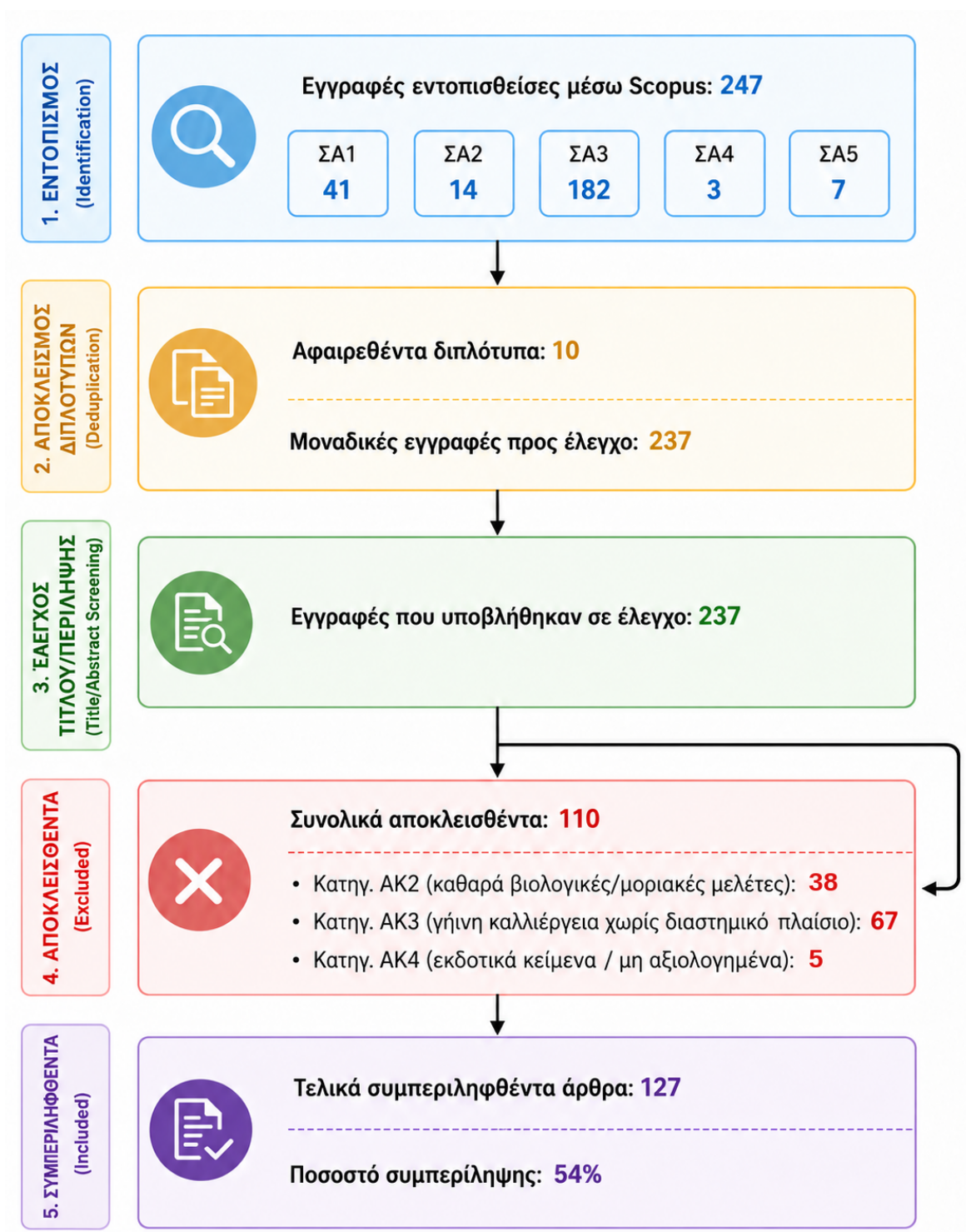
αξιολόγησης μέσω των κριτηρίων C1–C6. Τρίτον, αναδεικνύει έξι τεχνολογικά κενά G1–G6 που αφορούν την αυτονομία, το sensing, την ολοκλήρωση BLSS/ECLSS, τη ρομποτική, το Digital Twin και την ανθεκτικότητα. Τέταρτον, προτείνει τετραεπίπεδη IoST-SPA αρχιτεκτονική με εγκάρσιο επίπεδο ανθεκτικότητας. Πέμπτον, μεταφέρει την αρχιτεκτονική αυτή σε λειτουργικό εννοιολογικό μοντέλο διαστημικής φάρμας. Έκτον, προτείνει διαδρομή επικύρωσης από SiL και HiL έως αναλογικές, LEO και μελλοντικές πλανητικές δοκιμές.

2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1 Επιλογή Μεθοδολογίας

Η παρούσα μελέτη υιοθετεί τη μεθοδολογία της ανασκόπησης πεδίου εφαρμογής (scoping review) και ακολουθεί το πλαίσιο PRISMA-ScR (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses Extension for Scoping Reviews), το οποίο δημοσιεύθηκε ειδικά για τη διαφανή και αναπαραγώγιμη αναφορά ανασκοπήσεων πεδίου [15]. Η επιλογή αυτή προκύπτει από τη φύση του υπό διερεύνηση πεδίου. Η Διαστημική Γεωργία Ακριβείας είναι εγγενώς διεπιστημονική, ενσωματώνοντας ετερογενείς επιστημονικούς τομείς που εκτείνονται από τη διαστημική βιολογία και τα βιοαναγεννητικά συστήματα υποστήριξης ζωής έως τη γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος, την τεχνητή νοημοσύνη και τις τεχνολογίες αισθητήρων και δικτύων. Επιπλέον, ο τομέας εξελίσσεται ραγδαία και περιλαμβάνει ετερογενείς τύπους μελετών που δεν προσφέρονται για ενιαία στατιστική σύνθεση μέσω μετα-ανάλυσης.

Σε αντίθεση με μια συστηματική ανασκόπηση, η οποία συνήθως επικεντρώνεται στη σύνθεση και την κριτική αξιολόγηση συγκεκριμένων ερευνητικών ερωτημάτων βάσει αυστηρά προκαθορισμένων κριτηρίων, μια ανασκόπηση πεδίου εφαρμογής στοχεύει στη χαρτογράφηση του εύρους και του βάθους ενός ερευνητικού πεδίου, στον εντοπισμό κενών γνώσης και στον χαρακτηρισμό της υπάρχουσας βιβλιογραφίας όσον αφορά τη θεματική κατανομή, τους τύπους μελετών και τις χρονολογικές τάσεις δημοσίευσης [16]. Αυτός ο στόχος θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλος για τον παρόντα τομέα, όπου η ολοκληρωμένη χαρτογράφηση της βιβλιογραφίας προηγείται απαραίτητα κάθε προσπάθειας επίσημης σύνθεσης. Το πλαίσιο PRISMA-ScR διασφαλίζει την αναπαραγωγικότητα, τη διαφάνεια και τη μεθοδολογική αυστηρότητα σε όλα τα στάδια της διαδικασίας αξιολόγησης, από τον ορισμό των στρατηγικών αναζήτησης και την εφαρμογή κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού έως την κατηγοριοποίηση και ανάλυση των δημοσιεύσεων που περιλαμβάνονται. Η πλήρης μεθοδολογική ροή εργασίας, από την αρχική αναγνώριση των εγγραφών έως την τελική ένταξη των επιλέξιμων άρθρων, απεικονίζεται στην Εικόνα 2-1



Εικόνα 2-1 Διάγραμμα ροής επιλογής μελετών (PRISMA-ScR)

2.2 Στρατηγική Αναζήτησης

2.2.1 Επιλογή Βάσης Δεδομένων

Η συστηματική αναζήτηση βιβλιογραφίας διεξήχθη αποκλειστικά μέσω της βάσης δεδομένων Elsevier Scopus. Η επιλογή του Scopus έναντι άλλων βιβλιογραφικών βάσεων δεδομένων και ψηφιακών βιβλιοθηκών, όπως το Web of Science και το IEEE Xplore, βασίστηκε σε τρεις κύριες παραμέτρους. Πρώτον, το Scopus παρέχει εκτεταμένη κάλυψη πρακτικών από μεγάλα διεθνή συνέδρια που σχετίζονται με την διαστημική τεχνολογία και τα συστήματα υποστήριξης διαστημικής ζωής, συμπεριλαμβανομένου του Διεθνούς Αστροναυτικού Συνεδρίου (IAC), των διαστημικών συνεδρίων AIAA και των Πρακτικών του Συνεδρίου IEEE Aerospace, τα οποία θεωρούνται από τα πιο σημαντικά κανάλια δημοσίευσης στους τομείς της διαστημικής γεωργίας και των διαστημικών βιοτεχνολογιών [11]. Δεύτερον, η δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων αναζήτησης σε μορφή CSV διευκολύνει την επεξεργασία βιβλιογραφικών δεδομένων, καθώς και τον εντοπισμό και την αφαίρεση διπλότυπων εγγράφων. Τρίτον, το Scopus υποστηρίζει προηγμένη σύνταξη αναζήτησης μέσω του πεδίου TITLE-ABS-KEY, επιτρέποντας τον συνδυασμό λέξεων-κλειδίων, τελεστών Boolean και χρονικών περιορισμών με αυξημένη ακρίβεια και αναπαραγωγικότητα. Παρόλο που η χρήση μιας ενιαίας βάσης δεδομένων αποτελεί περιορισμό της παρούσας μελέτης, η Scopus θεωρήθηκε επαρκής για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας λόγω της ευρείας διεπιστημονικής κάλυψης και της υψηλής συγκέντρωσης σχετικών δημοσιεύσεων σε συνέδρια και ερευνητικές εργασίες.

2.2.2 Σχήματα Αναζήτησης και Αποτελέσματα

Ορίστηκαν πέντε σχήματα αναζήτησης (ΣΑ1-ΣΑ5) προκειμένου να καλύψουν τους κύριους θεματικούς άξονες του πεδίου. Η ανάπτυξη των σχημάτων αναζήτησης ακολούθησε μια επαναληπτική διαδικασία βελτίωσης, κατά την οποία τα αρχικά ερωτήματα αναζήτησης αξιολογήθηκαν ως προς την ακρίβεια και την ανάκληση και στη συνέχεια τροποποιήθηκαν ανάλογα. Η τελική αναζήτηση ολοκληρώθηκε στις 9 Απριλίου 2026, καλύπτοντας δημοσιεύσεις εντός του χρονικού διαστήματος 2006–2026. Το κατώτερο χρονικό όριο του 2006 επιλέχθηκε με βάση δύο κύριες παραμέτρους. Αρχικά, η περίοδος αυτή συμπίπτει με την εμφάνιση της σύγχρονης εποχής της Ελεγχόμενης Περιβαλλοντικής Γεωργίας (Controlled Environment Agriculture) που χρησιμοποιεί τεχνολογικές υποδομές μεταβιβάσιμες σε διαστημικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των πρώτων συστηματικών πειραματικών εφαρμογών του πρωτοτύπου συστήματος VEGGIE[17] της NASA και της έναρξης της φάσης επίδειξης του πιλοτικού προγράμματος MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative) [18] του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος. Δεύτερον, αυτή η χρονική οριοθέτηση διασφαλίζει ότι το σώμα κειμένων αντικατοπτρίζει το σύγχρονο τεχνολογικό τοπίο και όχι τα ιστορικά πειράματα της εποχής

του Ψυχρού Πολέμου που έχουν περιορισμένη άμεση εφαρμογή στα τρέχοντα συστήματα διαστημικής γεωργίας. Όσον αφορά την εφαρμογή του φίλτρου ανοικτής πρόσβασης (LIMIT-TO(OA,"all")), το φίλτρο εφαρμόστηκε σε όλα τα σχήματα αναζήτησης της παρούσας μελέτης. Η εφαρμογή του φίλτρου ανοικτής πρόσβασης θεωρήθηκε ιδιαίτερα σημαντική λόγω της διεπιστημονικής φύσης του πεδίου, στον οποίο ένα σημαντικό μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας δημοσιεύεται σε πρακτικά συνεδρίων, τεχνικές εκθέσεις και περιοδικά με ετερογενείς πολιτικές πρόσβασης. Η χρήση του φίλτρου μείωσε την ανάκτηση μη προσβάσιμων αρχείων, διευκολύνοντας έτσι τη συστηματική αξιολόγηση των δημοσιεύσεων που συμπεριλήφθηκαν στην τελική ανάλυση. Παρ' όλα αυτά, αναγνωρίζεται ότι η αποκλειστική χρήση δημοσιεύσεων ανοικτής πρόσβασης μπορεί να είχε ως αποτέλεσμα τον αποκλεισμό ορισμένων σημαντικών μελετών, ιδίως δημοσιεύσεων συνεδρίων από οργανισμούς όπως το IEEE και το AIAA, οι οποίες διανέμονται συχνά μέσω μοντέλων πρόσβασης βάσει συνδρομής. Κατά συνέπεια, αυτή η επιλογή αποτελεί μεθοδολογικό περιορισμό της παρούσας μελέτης και συζητείται λεπτομερέστερα στην Ενότητα 2.7. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αρκετοί όροι που χρησιμοποιούνται στο ΣΑ5, όπως η «έξυπνη γεωργία στο διάστημα», η «γεωργία IoST» και η «αυτόνομη παραγωγή τροφίμων στο διάστημα», δεν έχουν ακόμη καθιερωθεί ευρέως στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Επομένως, το ΣΑ5 σχεδιάστηκε ως ένα διερευνητικό ερώτημα που αποσκοπεί στον εντοπισμό αναδυόμενων δημοσιεύσεων που χρησιμοποιούν συγκλίνουσα ή πειραματική ορολογία σχετικά με τη γεωργία ακριβείας στο διάστημα. Τα επτά άρθρα που ανακτήθηκαν μέσω του ΣΑ5 επικαλύπτονταν εν μέρει με τα αποτελέσματα του ΣΑ1 και του ΣΑ2 και καταγράφηκαν και συγχωνεύθηκαν κατά το στάδιο της αφαίρεσης διπλότυπων.

Κωδ.	Σχήμα Αναζήτησης (σύνταξη Scopus)	Θεματικός Άξονας	Αποτ.
ΣΑ1	TITLE-ABS-KEY("space agriculture" OR "space farming" OR "space greenhouse" OR "space crop") AND ("IoT" OR "IoST" OR "sensor" OR "autonomous" OR "precision agriculture") AND PUBYEAR > 2005 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (OA, "all"))	Διαδίκτυο Διαστημικών Αντικειμένων + Διαστημική Γεωργία	41

ΣΑ2	TITLE-ABS-KEY(("space agriculture" OR "space greenhouse" OR "lunar greenhouse" OR "Mars greenhouse" OR "bioregenerative life support" OR BLSS OR CELSS) AND ("controlled environment agriculture" OR CEA OR "closed-loop agriculture" OR hydroponic*) AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "sensor fusion" OR "digital twin")) AND PUBYEAR > 2005 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (OA, "all"))	Τεχνητή Νοημοσύνη/Μηχανική Μάθηση σε Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος + Διαστημική Γεωργία	14
ΣΑ3	TITLE-ABS-KEY("microalgae" OR "Spirulina" OR "Chlorella" OR "cyanobacteria" OR "photobioreactor") AND ("life support" OR "MELiSSA" OR "BLSS") AND ("space" OR "lunar" OR "Mars") AND PUBYEAR > 2005 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (OA, "all"))	Μικροφύκη + Βιοαναγεννητικά Συστήματα Ζωής + MELiSSA	182
ΣΑ4	TITLE-ABS-KEY((robotic* OR automation OR "autonomous system*" OR rover*) AND ("space greenhouse*" OR "lunar base*" OR "Mars habitat*" OR CELSS OR BLSS) AND (harvest* OR cultivation OR "plant growth" OR crop*)) AND PUBYEAR > 2005 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (OA, "all"))	Ρομποτική και Αυτοματισμός σε Πλανητικές Βάσεις	3
ΣΑ5	TITLE-ABS-KEY("space smart farming" OR "space precision agriculture" OR "IoST agriculture" OR "autonomous space food production") AND ("AI" OR "sensor fusion") AND PUBYEAR > 2005 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (OA, "all"))	Διαστημική Έξυπνη Γεωργία (διερευνητικό σχήμα)	7
ΣΥΝΟΛΟ (με διπλότυπα)			247

Πίνακας 2-1 Σχήματα Αναζήτησης και Αποτελέσματα Αναζήτησης στη Scopus

2.3 Αποκλεισμός Διπλότυπων

Από το σύνολο των 247 ανακτημένων βιβλιογραφικών εγγραφών, εντοπίστηκαν 10 διπλότυπες εγγραφές, που αντιστοιχούσαν σε δημοσιεύσεις που εμφανίστηκαν ταυτόχρονα σε δύο ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε τρία διαφορετικά σχήματα αναζήτησης. Η ανίχνευση διπλότυπων πραγματοποιήθηκε κυρίως μέσω σύγκρισης του Ψηφιακού Αναγνωριστικού Αντικειμένου (DOI) και, για εγγραφές χωρίς διαθέσιμο DOI, μέσω σύγκρισης κανονικοποιημένων τίτλων. Η πλειονότητα των διπλότυπων εγγραφών (επτά στις δέκα) εντοπίστηκαν μεταξύ ΣΑ1 και ΣΑ5, κάτι που θεωρήθηκε αναμενόμενο λόγω της θεματικής επικάλυψης μεταξύ των δύο σχημάτων αναζήτησης. Η διαδικασία αφαίρεσης διπλότυπων πραγματοποιήθηκε πριν από το στάδιο ελέγχου τίτλου και περίληψης, προκειμένου να αποφευχθεί η επαναλαμβανόμενη αξιολόγηση πανομοιότυπων δημοσιεύσεων. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αφαίρεσης διπλότυπων,

παρέμειναν 237 μοναδικές εγγραφές και στη συνέχεια υποβλήθηκαν στο επόμενο στάδιο ελέγχου.

2.4 Κριτήρια Συμπερίληψης και Αποκλεισμού

Τα κριτήρια ένταξης (ΚΕ) και αποκλεισμού (ΚΑ) ορίστηκαν εκ των προτέρων, πριν από την εφαρμογή τους στα ανακτημένα αρχεία, σύμφωνα με τις οδηγίες PRISMA-ScR. Η ανάπτυξή τους βασίστηκε στο πλαίσιο PCC (Population, Concept, Context)[19], το οποίο συνιστάται ρητά για τις αξιολογήσεις πεδίου εφαρμογής σε αντίθεση με το πιο κλινικά προσανατολισμένο πλαίσιο PICOS (Population, Intervention, Comparison, Outcome, Study Design)[20]. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η διάσταση του Πληθυσμού αναφέρεται σε συστήματα καλλιέργειας που βασίζονται στο διάστημα και σε συστήματα βιοαναγεννητικής υποστήριξης ζωής. Η διάσταση της Έννοιας αφορά την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου του Διαδικτύου των Διαστημικών Πραγμάτων (IoST), της τεχνητής νοημοσύνης, του αυτοματισμού και της ρομποτικής, ενώ η διάσταση του Πλαισίου περιλαμβάνει μακράς διάρκειας επανδρωμένες αποστολές στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS), καθώς και μελλοντικά περιβάλλοντα σεληνιακών και αρειανών αποστολών.

Κωδ.	Κατηγορία	Περιγραφή
ΚΕ1	Θεματική Σύνδεση — Διάστημα	Μελέτες που αφορούν καλλιέργεια φυτών ή καλλιέργεια μικροοργανισμών σε Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, Σελήνη, Άρη ή αναλογικές αποστολές (analog missions) δηλαδή μελέτες που προσομοιώνουν στη γη διαστημικές αποστολές. Περιλαμβάνονται επίσης μελέτες γεωργίας ελεγχόμενου περιβάλλοντος που αναφέρονται ρητά σε μεταφορά τεχνολογίας σε διαστημικό πλαίσιο.
ΚΕ2	Τεχνολογική Συνεισφορά	Αισθητήρες, Διαδίκτυο Πραγμάτων / Διαδίκτυο Διαστημικών Αντικειμένων, αυτοματισμός, ρομποτική, τεχνητή νοημοσύνη / μηχανική μάθηση ή υπολογιστική νέφος για τον έλεγχο διαστημικής καλλιέργειας ή βιοαναγεννητικών συστημάτων. Καθαρά βιολογικές μελέτες χωρίς τεχνολογικό στοιχείο εξαιρούνται (βλ. ΚΑ2).
ΚΕ3	Τύπος Δημοσίευσης	Πρωτότυπα άρθρα αξιολογημένα από ομότιμους (peer-reviewed), ανακοινώσεις συνεδρίων, συστηματικές/χαρτογραφικές ανασκοπήσεις και κεφάλαια βιβλίων. Εξαιρούνται εκδοτικά κείμενα και μη αξιολογημένες δημοσιεύσεις.

ΚΕ4	Γλώσσα και Χρονικό Εύρος	Αγγλική γλώσσα · χρονικό εύρος 2006–2026 · ημερομηνία εξαγωγής δεδομένων: 9 Απριλίου 2026.
ΚΑ1	Επισκοπήσεις Συνεδρίων	Γενικές επισκοπήσεις προγράμματος συνεδρίου χωρίς πρωτότυπα ερευνητικά δεδομένα που αναφέρονται στην αγγλόφωνη ορολογία ως conference session overviews.
ΚΑ2	Καθαρά Βιολογικές ή Μοριακές Μελέτες	Επιγενετικές ή μοριακές βιολογικές μελέτες χωρίς τεχνολογικό πλαίσιο και χωρίς άμεση εφαρμογή σε διαστημικό σύστημα καλλιέργειας ή βιοαναγεννητικό σύστημα ζωής.
ΚΑ3	Γήινη Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος χωρίς Διαστημική Συνάφεια	Αστική ή κατακόρυφη καλλιέργεια, επεξεργασία υγρών αποβλήτων, παραγωγή βιοκαυσίμων ή γεωργία ακριβείας χωρίς αναφορά σε διαστημικούς περιορισμούς ή μεταφορά τεχνολογίας.
ΚΑ4	Εκδοτικά Κείμενα και Μη Ακαδημαϊκές Δημοσιεύσεις	Εκδοτικά κείμενα (editorials), γνωμοδοτήσεις, επιστολές και κείμενα χωρίς πρωτότυπα ερευνητικά δεδομένα.

Πίνακας 2-2 Κριτήρια Συμπερίληψης και Αποκλεισμού

2.5 Διαδικασία Ελέγχου

2.5.1 Ροή Εργασίας

Ο αρχικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε με ανάγνωση τίτλου και περίληψης (title/abstract screening) κάθε εγγραφής και εφαρμογή των κριτηρίων ΚΕ1–ΚΕ4 και ΚΑ1–ΚΑ4. Για τις εγγραφές που κρίθηκαν θεματικά συναφείς, η τελική ένταξη στο βιβλιογραφικό σώμα επιβεβαιώθηκε κατά την ανάγνωση και εξαγωγή των πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκαν στη θεματική σύνθεση. Δεδομένης της φύσης της εργασίας ως μεταπτυχιακής διατριβής ενός ερευνητή, δεν εφαρμόστηκε ανεξάρτητη επαλήθευση από δεύτερο αξιολογητή. Η απουσία δεύτερου αξιολογητή αναγνωρίζεται ως περιορισμός, επειδή μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο υποκειμενικής ταξινόμησης σε οριακές περιπτώσεις. Η μη διενέργεια τυπικής αξιολόγησης μεθοδολογικής ποιότητας των επιμέρους μελετών είναι συμβατή με τον χαρτογραφικό χαρακτήρα της ανασκόπησης πεδίου, αλλά δεν αναιρεί τον παραπάνω περιορισμό της διαδικασίας επιλογής.

Για την αντιμετώπιση οριακών περιπτώσεων, δηλαδή άρθρων των οποίων η θεματική εμπίπτει μερικώς σε δύο ή περισσότερα κριτήρια, εφαρμόστηκε η αρχή του κυρίαρχου θέματος, εάν το πρωτεύον ερευνητικό ερώτημα του άρθρου αφορά διαστημική καλλιέργεια ή βιοαναγεννητικό σύστημα ζωής, το άρθρο συμπεριλήφθηκε, ακόμα και αν η τεχνολογική συνεισφορά ήταν δευτερεύουσα.

2.5.2 Αποτελέσματα Ελέγχου

Από τις 237 μοναδικές εγγραφές που υποβλήθηκαν σε έλεγχο, αποκλείστηκαν συνολικά 110 δημοσιεύσεις και συμπεριλήφθηκαν 127 άρθρα, αντιστοιχώντας σε ποσοστό συμπερίληψης 54%. Η κατανομή των αποκλεισθέντων ανά κριτήριο δείχνει ότι η πλειονότητα των αποκλεισμών (67 εκ των 110, δηλαδή περίπου 61%) οφείλεται στο κριτήριο ΚΑ3, το οποίο αφορά γήινη γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος χωρίς διαστημικό πλαίσιο. Το εύρημα αυτό αντικατοπτρίζει τον θόρυβο που εισάγει το ΣΑ3, το οποίο, λόγω της ευρείας ορολογίας των μικροφυκών, ανέκτησε σημαντικό αριθμό άρθρων με θεματική επικεντρωμένη σε εφαρμογές βιοκαθαρισμού, βιοκαυσίμων και διαχείρισης αποβλήτων χωρίς διαστημικό αντίκρισμα.

Κριτήριο	Λόγος Αποκλεισμού	Πλήθος	Παρατήρηση
ΚΑ3	Γήινη γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος, βιοκαύσιμα, επεξεργασία αποβλήτων χωρίς διαστημική συνάφεια	67	Κυρίως άρθρα βιοδιωλιστηρίου μικροφυκών από το ΣΑ3
ΚΑ2	Καθαρά μοριακές και βιολογικές μελέτες χωρίς εφαρμογή σε βιοαναγεννητικά συστήματα ζωής	38	Γενομικές και πρωτεομικές μελέτες κυανοβακτηρίων, με έμφαση στο γένος <i>Arthrospira</i>
ΚΑ4	Εκδοτικά κείμενα και μη αξιολογημένες δημοσιεύσεις	4	Επισκοπήσεις συνεδρίων και εκδοτικά κείμενα
	ΣΥΝΟΛΟ ΑΠΟΚΛΕΙΣΘΕΝΤΩΝ	110	

Πίνακας 2-3 Ανάλυση Αποκλεισθέντων Δημοσιεύσεων ανά Κριτήριο

2.6 Κατηγοριοποίηση των Συμπεριληφθέντων Δημοσιεύσεων

Τα 127 άρθρα που συμπεριλήφθηκαν κατηγοριοποιήθηκαν σε τέσσερις θεματικούς άξονες (Α1–Α4) σύμφωνα με το κυρίαρχο ερευνητικό ζητούμενο κάθε δημοσίευσης. Αυτή η κατηγοριοποίηση διευκόλυνε τη συστηματική θεματική ανάλυση της βιβλιογραφίας και τον εντοπισμό των κύριων τεχνολογικών και ερευνητικών κατευθύνσεων στον τομέα.

Σε περιπτώσεις εννοιολογικής επικάλυψης, ιδιαίτερα μεταξύ Α2 (Διαστημική Γεωργία και Τεχνολογία) και Α3 (Ελεγχόμενη Γεωργία και Τεχνολογία Περιβάλλοντος), κάθε άρθρο κατηγοριοποιήθηκε αποκλειστικά στον άξονα που αντιστοιχεί στο κύριο ερευνητικό του ερώτημα. Δεν εφαρμόστηκε πολλαπλή ετικετοποίηση (multi-label tagging). Η κατανομή ανά θεματικό άξονα παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-4.

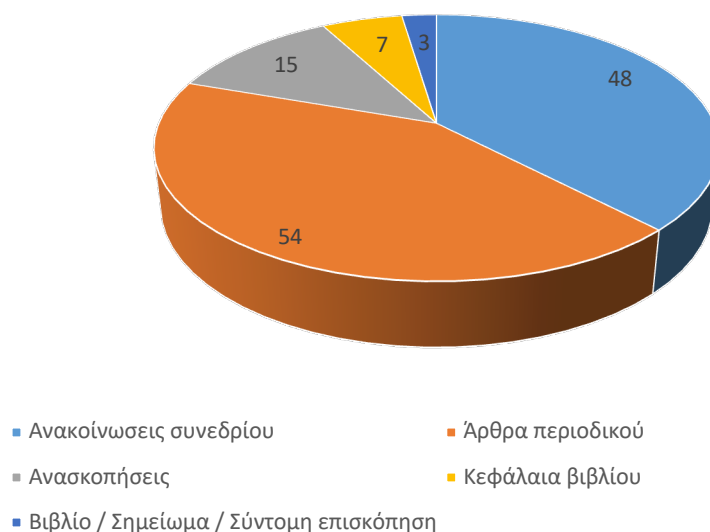
Άξονας	Κατηγορία	Περιγραφή	Άρθρα	Κεφ. 3
A1	Διαστημική Βιολογία και Συστήματα	Πειράματα Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού, αναλογικές αποστολές, MELISSA, βιοαναγεννητικά συστήματα ζωής, μικροφύκη για υποστήριξη ζωής.	97	3.1
A2	Διαστημική Γεωργία και Τεχνολογία	Διαδίκτυο Διαστημικών Αντικειμένων, τεχνητή νοημοσύνη/μηχανική μάθηση, υπολογιστική αιχμής ή ρομποτική σε διαστημικά συστήματα καλλιέργειας.	15	3.2
A3	Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος και Τεχνολογία	Γήινη γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος με τεχνολογικές καινοτομίες που αναφέρονται ρητά ως εφαρμόσιμες σε διαστημικό πλαίσιο.	7	3.3
A4	Ανασκοπήσεις και Γενικές Μελέτες	Ανασκοπήσεις και γενικές μελέτες που καλύπτουν πολλαπλούς θεματικούς άξονες.	8	3.4
ΣΥΝΟΛΟ			127	

Πίνακας 2-4 Κατανομή Συμπεριληφθέντων Δημοσιεύσεων ανά Θεματικό Άξονα

Τύπος Δημοσίευσης	Πλήθος	Κύριες Πηγές
Ανακοινώσεις συνεδρίου (conference paper)	48	ΔΑΣ, IEEE Aerospace, AIAA Space, σύνοδοι ΕΟΔ
Άρθρα περιοδικού (journal article)	54	Frontiers, Acta Astronautica, Life Sciences in Space Research
Ανασκοπήσεις (review)	15	Frontiers, Sustainability, Applied Sciences
Κεφάλαια βιβλίου (book chapter)	7	Springer, Elsevier — διαστημικές επιστήμες ζωής
Βιβλίο / Σημείωμα / Σύντομη επισκόπηση	3	Μονογραφίες συστημάτων βιοαναγεννητικής υποστήριξης ζωής
ΣΥΝΟΛΟ	127	

Πίνακας 2-5 Κατανομή ανά Τύπο Δημοσίευσης

Κατανομή ανά Τύπο Δημοσίευσης



Εικόνα 2-2 Κατανομή των 127 συμπεριληφθέντων δημοσιεύσεων ανά τύπο δημοσίευσης

Περίοδος	Άρθρα	Σημαντικά Γεγονότα και Τάσεις
2006–2010	11	Πρώτα πειράματα Lada στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, ανάπτυξη CELSS, πρώτη φάση MELiSSA.
2011–2015	8	Εγκατάσταση VEGGIE το 2014, πρώτες δοκιμές τεχνολογίας εκπομπής διόδων φωτός σε μικροβαρύτητα.
2016–2018	14	Πρώτη κατανάλωση VEGGIE, αποστολή APH το 2017, σχεδιασμός EDEN ISS.
2019–2020	13	Πρώτα πειράματα APH, EDEN ISS στην Ανταρκτική, άνοδος τεχνητής νοημοσύνης στη γεωργία.
2021–2022	20	Artemis I, ανανεωμένο ενδιαφέρον σεληνιακής γεωργίας, MELiSSA Πιλοτικός Σταθμός.
2023	17	CHAPEA Mission 1, Artemis II, μεγάλης γλωσσικής νοημοσύνης εφαρμογές στη γεωργία ακριβείας.
2024	20	Άνοδος Διαδικτύου Διαστημικών Αντικειμένων, πρωτότυπα ρομποτικής για διαστημικά θερμοκήπια.
2025–2026*	24	Μελέτες σκοπιμότητας Artemis III, βιολογική αξιοποίηση επί τόπου πόρων — ταχεία άνοδος.
ΣΥΝΟΛΟ	127	* Ημερομηνία εξαγωγής δεδομένων: 9 Απριλίου 2026

Πίνακας 2-6 Χρονική Κατανομή Συμπεριληφθέντων Δημοσιεύσεων

Η χρονολογική κατανομή των δημοσιεύσεων που περιλαμβάνονται καταδεικνύει μια σαφή ανοδική τάση μετά το 2021, η οποία συμπίπτει χρονικά με το ανανεωμένο διεθνές

ενδιαφέρον για τις επανδρωμένες σεληνιακές αποστολές στο πλαίσιο του προγράμματος Artemis[21]. Επιπλέον, ο αυξημένος αριθμός δημοσιεύσεων κατά την περίοδο 2025-2026 (24 άρθρα που εντοπίστηκαν μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας αναζήτησης τον Απρίλιο του 2026) αποτελεί εμπειρικό εύρημα που προκύπτει απευθείας από το τελικό σώμα κειμένων της παρούσας ανασκόπησης.

2.7 Περιορισμοί της Μεθοδολογίας

Κάθε μεθοδολογία εμπεριέχει περιορισμούς που πρέπει να αναγνωρισθούν ρητά. Στην παρούσα εργασία εντοπίστηκαν έξι κύριοι περιορισμοί:

α) Αποκλειστική χρήση Scopus: Η μη αναζήτηση σε άλλες βάσεις δεδομένων, όπως το IEEE Xplore και το Web of Science, ενδέχεται να έχει οδηγήσει σε παράλειψη άρθρων που ευρετηριάζονται αποκλειστικά σε αυτές, καθώς και τεχνικών αναφορών της NASA και της ESA.

β) Αποκλειστική χρήση δημοσιεύσεων ανοικτής πρόσβασης: Η εφαρμογή του φίλτρου Open Access σε όλα τα σχήματα αναζήτησης ενδέχεται να περιόρισε την ανάκτηση σημαντικών συνδρομητικών δημοσιεύσεων, ιδιαίτερα συνεδριακών εργασιών από οργανισμούς όπως η IEEE και η AIAA, εισάγοντας πιθανή μεροληψία επιλογής.

γ) Γλωσσικός περιορισμός: Ο αποκλεισμός δημοσιεύσεων σε γλώσσες πλην της αγγλικής έχει ως αποτέλεσμα την παράλειψη σημαντικής ρωσόφωνης βιβλιογραφίας σχετικής με το πρόγραμμα BIOS-3 και βιβλιογραφίας στην κινεζική γλώσσα, σχετικής με το πρόγραμμα Lunar Palace (月宫一号), τα οποία αποτελούν κομβικές συνεισφορές στο πεδίο.

δ) Έλεγχος από έναν ερευνητή: Η απουσία δεύτερου ανεξάρτητου αξιολογητή εισάγει κίνδυνο υποκειμενικής κατηγοριοποίησης σε οριακές περιπτώσεις, ιδίως για άρθρα που εμπίπτουν εξίσου στα κριτήρια KE2 και KA2.

ε) Μη αμοιβαία αποκλειόμενη κατηγοριοποίηση: Η κατηγοριοποίηση βάσει κυρίαρχου θέματος δεν είναι αλγοριθμική, αλλά βασίζεται σε εκτίμηση του ερευνητή. Άρθρα που

καλύπτουν ισοδύναμα τους άξονες A2 και A3 ενδέχεται να έχουν ενταχθεί σε διαφορετικό άξονα από αυτόν που θα επέλεγε άλλος ερευνητής.

ζ) Χρονικό όριο εξαγωγής δεδομένων: Η εξαγωγή δεδομένων ολοκληρώθηκε στις 9 Απριλίου 2026, συνεπώς νεότερες δημοσιεύσεις δεν περιλαμβάνονται στο corpus. Λαμβανομένου υπόψη του ταχέως εξελισσόμενου χαρακτήρα του πεδίου

3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Το παρόν κεφάλαιο συνθέτει τα αποτελέσματα της ανασκόπησης πεδίου εφαρμογής των 127 δημοσιεύσεων που συμπεριλήφθηκαν στο τελικό βιβλιογραφικό σώμα. Η ανάλυση δεν περιορίζεται σε απλή απαρίθμηση άρθρων, αλλά οργανώνει τη γνώση σε τέσσερις αλληλοσυμπληρούμενους άξονες: A1 — Διαστημική Βιολογία και Βιοαναγεννητικά Συστήματα Υποστήριξης Ζωής, A2 — Διαστημική Γεωργία και Τεχνολογία, A3 — Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος και Τεχνολογία, και A4 — Ανασκοπήσεις και Γενικές Μελέτες. Το κύριο σώμα λειτουργεί ως συνθετική βιβλιογραφική ανασκόπηση και όχι ως απλό μητρώο δημοσιεύσεων.

3.1 Άξονας A1: Διαστημική Βιολογία και Βιοαναγεννητικά Συστήματα Υποστήριξης Ζωής

Ο πρώτος θεματικός άξονας συγκεντρώνει 97 δημοσιεύσεις που καλύπτουν τον πυρήνα της διαστημικής βιολογίας εφαρμοσμένης σε συστήματα υποστήριξης ζωής. Το βιβλιογραφικό σώμα παρουσιάζει ταχεία εξέλιξη, με το 80% των δημοσιεύσεων να εντοπίζεται στην περίοδο 2020–2025, αντικατοπτρίζοντας την ανανέωση ενδιαφέροντος που συνδέεται με τις αποστολές Artemis[22].

Στον Άξονα A1 εξετάζονται οι βιολογικές και βιοαναγεννητικές βάσεις της διαστημικής γεωργίας, δηλαδή οι οργανισμοί, τα καλλιεργητικά συστήματα και οι κύκλοι ανακύκλωσης

που μπορούν να στηρίξουν μακροχρόνια ανθρώπινη παρουσία εκτός Γης. Η ανάλυση ξεκινά από τα μικροφύκη, τα κυανοβακτήρια και τα ανώτερα φυτά, επειδή αυτά αποτελούν τους βασικούς βιολογικούς φορείς παραγωγής οξυγόνου, τροφής, βιομάζας και θρεπτικών ροών. Στη συνέχεια εξετάζονται τα βιοαναγεννητικά συστήματα υποστήριξης ζωής, με έμφαση στο MELiSSA, στους φωτοβιοαντιδραστήρες και στη βιολογική αξιοποίηση επιτόπιων πόρων, καθώς αυτά συγκροτούν τον τεχνολογικό πυρήνα της μετάβασης από απλές καλλιέργειες σε ολοκληρωμένα συστήματα υποστήριξης ζωής. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται επίσης στην ανθεκτικότητα των οργανισμών σε εξωγήινες καταπονήσεις, όπως ακτινοβολία, χαμηλή πίεση, ξηρασία, υπερχλωρικά άλατα και συνθήκες μικροβαρύτητας, διότι η βιολογική λειτουργικότητα σε ακραίο περιβάλλον αποτελεί προϋπόθεση για οποιαδήποτε εφαρμογή διαστημικής γεωργίας. Με αυτόν τον τρόπο, ο Άξονας A1 λειτουργεί ως το βιολογικό θεμέλιο της εργασίας: δείχνει ποιοι οργανισμοί και ποια BLSS υποσυστήματα είναι ήδη τεκμηριωμένα, ποια παραμένουν πειραματικά ή χαμηλής ωριμότητας, και ποια ερευνητικά κενά πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαμόρφωση της προτεινόμενης IoST-SPA αρχιτεκτονικής στα επόμενα κεφάλαια.

3.1.1 Χαρτογράφηση του Βιβλιογραφικού Σώματος: Οργανισμοί, Προγράμματα και Τάσεις

Τα κυανοβακτήρια και τα μικροφύκη αποτελούν τους πλέον συχνά μελετώμενους οργανισμούς, με παρουσία σε περισσότερα από 42 και 26 άρθρα αντίστοιχα. Κυριαρχούν είδη όπως η *Limnospira indica*, η *Chlorella vulgaris* και το γένος *Anabaena* sp., λόγω της ικανότητάς τους για φωτοσύνθεση, δέσμευση αζώτου και παραγωγή οξυγόνου. Από τα ανώτερα φυτά, μελετώνται κυρίως το μαρούλι (*Lactuca sativa*), το σιτάρι, η τομάτα και η πατάτα.

Σε ό, τι αφορά τη θεματική κατανομή, τα BLSS/ECLSS εμφανίζονται σε ~40 άρθρα, οι φωτοβιοαντιδραστήρες (PBR) σε 31, η ISRU σε 19, η Υδροπονία/Αεροπονία σε 17 και η Συνθετική Βιολογία σε 5 άρθρα [23],[22], [24].

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ΕΟΔ/ESA) ηγείται με παρουσία σε 47 άρθρα, άμεσα συνδεδεμένη με το MELiSSA, ενώ η NASA έπεται με 45 άρθρα [25],[26]. Σε επίπεδο διαστημικών προγραμμάτων, το MELiSSA αναφέρεται σε 35 άρθρα. Η μεγαλύτερη

συγκέντρωση στο βιβλιογραφικό σώμα. Και ακολουθεί το ISS [27] με 32 άρθρα, το Artemis έχει 10, το BIOS-3 [28] και το VEGGIE 6 άρθρα έκαστο.

Χρονολογικά, πριν το 2020 η έρευνα επικεντρωνόταν σε μαθηματικά μοντέλα BLSS, πειράματα μικροοργανισμών σε PBR και μελέτες ακτινοανθεκτικότητας [29], [30]. Μετά το 2020 η εστίαση στράφηκε δυναμικά προς τη βιολογική ISRU, δηλαδή βιολογικών οργανισμών ή βιολογικών διεργασιών για την αξιοποίηση τοπικών πόρων στη Σελήνη, στον Άρη ή σε άλλο εξωγήινο περιβάλλον, ώστε να παραχθούν χρήσιμα προϊόντα για μια αποστολή. Τη Συνθετική Βιολογία και τη βιο-ορυκτοποίηση (biomineralization) για κατασκευή δομών στο διάστημα [31],[32].

Παράλληλα, η βιβλιογραφική χαρτογράφηση αναδεικνύει μια ισχυρή εστίαση στην αξιολόγηση μεμονωμένων καλλιεργειών σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα και αναλογικές εγκαταστάσεις. Κλασικές μελέτες έχουν τεκμηριώσει τη συμπεριφορά βασικών καλλιεργειών σε υδροπονικά συστήματα για βιοαναγεννητικούς σκοπούς, όπως η επιλογή ποικιλιών σιταριού [33] [34], η ανάπτυξη πατάτας και η ανάλυση της θρεπτικής αξίας φυτών όπως το *Gynura bicolor* σε συστήματα πορώδους σωλήνα [35] [Wang et al. - Nutritional status and ion uptake response of *Gynura bicolor* DC. between Porous-tube and traditional hydroponic growth systems]. Η διαστημική καλλιέργεια φυτών θεμελιώθηκε πάνω σε πρωτοποριακά πρότυπα, όπως το ριζικό σύστημα τριχοειδούς πλέγματος (capillary mat) του συστήματος VEGGIE [17]. Στο μέτωπο της βιολογικής διαχείρισης πόρων, η αποκωδικοποίηση του γονιδιώματος του *Arthrospira* sp. PCC 8005 [36] έθεσε τη βάση για τη μοριακή κατανόηση της ανθεκτικότητας των κυανοβακτηρίων, ενώ αναπτύχθηκαν καινοτόμες λύσεις για την ανακύκλωση αποβλήτων, όπως η βιο-ηλεκτροχημική αφαίρεση οργανικού φορτίου και η ανάκτηση αζώτου από τα ούρα μέσω μεμβρανών [37]. Η κάλυψη των τεράστιων ενεργειακών αναγκών αυτών των συστημάτων υποστηρίζεται από νέες τεχνολογίες, όπως οι ελλειπτικοί ηλιακοί συγκεντρωτές για την ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και ανάπτυξη μικροαλγών [38]. Τέλος, η συνολική αρχιτεκτονική υποστήριξης ζωής δοκιμάζεται πλέον και σε νέα υπερσύγχρονα επίγεια αναλογικά περιβάλλοντα, όπως το SAM [39].

Πέρα από τη βασική παραγωγή βιομάζας, μια εξαιρετικά σημαντική τάση στο βιβλιογραφικό σώμα αφορά τη στοχευμένη γενετική και αγρονομική βελτιστοποίηση των καλλιεργειών. Ειδικότερα, νεότερες μελέτες εστιάζουν στη βιοενίσχυση (biofortification) πρότυπων φυτών, όπως το μαρούλι, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της θρεπτικής τους αξίας και την προστασία των αστροναυτών από την οστική απώλεια [40], καθώς και στη γενικότερη βελτιστοποίηση της μορφολογίας και της φυσιολογίας των φυτών ειδικά για περιβάλλοντα ελεγχόμενης γεωργίας στο διάστημα. Παράλληλα, τα μικροφύκη αναδεικνύονται πλέον όχι μόνο ως μηχανισμοί αναγέννησης αέρα, αλλά ως ολοκληρωμένες και βιώσιμες λύσεις για την επισιτιστική ασφάλεια σε πολυπλανητικές φάρμες. Τέλος, για τη μετάβαση από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό σε μόνιμες πλανητικές εγκαταστάσεις, κομβικό ρόλο διαδραματίζει ο εντοπισμός των κρίσιμων παραγόντων σχεδιασμού απολύτως κλειστών οικοσυστημάτων για σεληνιακές αποστολές σε συνδυασμό με την ανάπτυξη νέων βιοδιεργασιών για την καλλιέργεια εξειδικευμένων στελεχών, όπως το *Synechococcus nidulans*, αξιοποιώντας αρειανούς πόρους [41], [42], [43], [44].

3.1.2 Μικροφύκη και Κυανοβακτήρια: Συγκριτική Αξιολόγηση

Η σύγκριση ανώτερων φυτών έναντι μικροαλγών-κυανοβακτηρίων για BLSS αποτελεί διαρκές θέμα στο βιβλιογραφικό σώμα. Τα ανώτερα φυτά προσφέρουν ψυχολογική υποστήριξη, ποικιλία διατροφής και υδατάνθρακες, αλλά απαιτούν μεγάλες εκτάσεις, υψηλή ενεργειακή κατανάλωση για τεχνητό φωτισμό και πολύπλοκα συστήματα άρδευσης σε μικροβαρύτητα, όπου οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης δημιουργούν υποξικά στρώματα νερού γύρω από τις ρίζες. Παράλληλα, παράγουν υψηλό ποσοστό μη εδώδιμης βιομάζας που δυσχεραίνει την ανακύκλωση [22], [24], [45].

Αντίθετα, τα μικροφύκη και κυανοβακτήρια επιτυγχάνουν δείκτη συγκομιδής ~100%, μεγαλύτερη αποδοτικότητα δέσμευσης CO₂ ανά μονάδα όγκου και, ως υγρές καλλιέργειες, δυνατότητα ευκολότερης αυτοματοποίησης [26], [46]. Για αυτόν τον λόγο, οι φωτοβιοαντιδραστήρες αξιολογούνται ως τεχνολογικά εγγύτερα σε πρακτική ενσωμάτωση στα φυσικοχημικά LSS για αναγέννηση αέρα και παραγωγή συμπληρωματικής πρωτεΐνης, δεδομένου ότι δοκιμάζονται ήδη επιτυχώς στον ISS (πειράματα *Arthrospira-B* και

Arthrospira-C)[47],[26]. Ας δούμε όμως τα σημαντικότερα στελέχη που χρησιμοποιήθηκαν.

3.1.3 *Limnospira indica*

Η *Limnospira indica* αποτελεί τον πλέον καθιερωμένο οργανισμό BLSS και τον πυρήνα του MELiSSA. Η διατροφική της αξία είναι εξαιρετική. Αποτελείται κατά 50–70% από πρωτεΐνη και είναι πλούσια σε απαραίτητα λιπαρά οξέα, βιταμίνες και αντιοξειδωτικές χρωστικές (φυκοκυανίνη). Δεν διαθέτει κυτταρικό τοίχωμα κυτταρίνης, καθιστώντας την άμεσα εύπεπτη χωρίς επεξεργασία[48],[49]. Αναπτύσσεται σε ευθύγραμμα νημάτια που δεν σχηματίζουν εύκολα βιοϋμένια, διευκολύνοντας ανάδευση και συγκομιδή [50]. Η αντοχή της δε στην ακτινοβολία είναι αξιοσημείωτη: επιβιώνει σε δόσεις γ-ακτινοβολίας έως 6.400 Gy[30].

Τα μειονεκτήματά της, που την αποκλείουν από το να στηρίξει μόνη της μια πλήρη ISRU στρατηγική εντοπίζονται στη γεύση («χωματώδης», «θειούχης» οσμής), κάτι που περιορίζει τη συνιστάμενη ημερήσια κατανάλωση στα 10 γραμμάρια [51], στην αδυναμία δέσμευσης ατμοσφαιρικού αζώτου και αποσάθρωσης ζεόλιθου [52],[23]. Ως προς τα αποθηκευτικά χαρακτηριστικά, μελετήθηκαν οι συνθήκες που επιτρέπουν τη διατήρηση του βιολογικού υλικού σε λανθάνουσα ή μεταβολικά υποβαθμισμένη κατάσταση κατά τη φάση μεταφοράς. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε σκοτεινές και ψυχρές συνθήκες αποθήκευσης. Οι οποίες μπορούν να περιορίσουν τον μεταβολικό ρυθμό και να παρατείνουν τη βιωσιμότητα της καλλιέργειας έως την επανενεργοποίησή της σε κατάλληλο περιβάλλον ανάπτυξης[50].

3.1.4 *Chlorella vulgaris*

Η *Chlorella vulgaris* μελετάται εντατικά από από τη NASA και αλλά και από τον DLR για αναγέννηση της ατμόσφαιρας του σταθμού αλλά ταυτόχρονα και για παραγωγή τροφής. Ξεχωρίζει δε για την προσαρμοστικότητα της σε ευρύ εύρος pH, θερμοκρασίας και CO₂. Δείχνει αντίσταση σε επιμολύνσεις και η παραγωγικότητα της βιομάζας φτάνει τα 4 g/L ημερησίως με πρωτεϊνική σύνθεση ~55%. Το κεντρικό μειονέκτημά της είναι το παχύ κυτταρικό τοίχωμα κυτταρίνης το οποίο την κάνει μη εύπεπτη για τον ανθρώπινο οργανισμό χωρίς κατάλληλη επεξεργασία. Η επεξεργασία αυτή όμως απαιτεί

ενεργοβόρες διαδικασίες ώστε να την διασπάσει πριν την κατανάλωση[26], [46]. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι τάση σχηματισμού βιοϋμενίων σε περιοχές υψηλού φωτισμού μειώνει τη διείσδυση της φωτεινής ακτινοβολίας στον αντιδραστήρα, ενώ ορισμένα μεταβολικά υποπροϊόντα της μπορεί να λειτουργήσουν τοξικά για ανώτερα φυτά στο ίδιο BLSS [53].

3.1.5 *Chroococcidiopsis* sp.

Τα πολυακραίοφιλα κυανοβακτήρια του γένους *Chroococcidiopsis* sp. αναδεικνύονται ως κορυφαίοι υποψήφιοι για βιο-ISRU σε Σελήνη και Άρη. Διαθέτουν ανθεκτικότητα στην ξηρασία, τις ακραίες θερμοκρασίες, την ιονίζουσα ακτινοβολία και τα τοξικά υπερχλωρικά άλατα του αρεϊκού εδάφους [54], [55],[56]. Μπορούν να αποθηκευτούν αφυδατωμένα για χρόνια και να αναβιώσουν με επιτυχία όταν χρειαστεί. Ορισμένα στελέχη (CCMEE 010) διαθέτουν ικανότητα φωτοεγκλιματισμού στο άπω ερυθρό φως (FaRLiP). Ο κύριος περιορισμός είναι ο εξαιρετικά αργός ρυθμός ανάπτυξης (χρόνος διπλασιασμού 4–16 ημέρες) και η αδυναμία δέσμευσης αζώτου, που απαιτεί εξωτερικές πηγές αζώτου (π.χ. ουρία από ούρα πληρώματος).

3.1.6 *Anabaena* και *Nostoc*

Τα νηματοειδή κυανοβακτήρια *Anabaena* sp. PCC 7938 και *Nostoc* θεωρούνται «βιολογικά πρωτοπόρα» για τροφοδοσία δευτερογενών καλλιεργειών. Είναι διαζωτοτροφικά, επιδεικνύουν άριστες επιδόσεις βιο-αποσάθρωσης ρεγόλιθου και παράγουν τη μέγιστη βιομάζα σε προσομοιώματα ρεγόλιθου Σελήνης-Άρη [57]. Μετά από λύση των κυττάρων δηλαδή τη φυσική ρήξη και καταστροφή του κυτταρικού τοιχώματος και της κυτταρικής μεμβράνης, χρησιμεύουν ως εξαιρετικό θρεπτικό υπόστρωμα (feedstock) για *E. coli* ή φυτά (*Lemna* sp. -Φακή του νερού) [31]. Ωστόσο, η επιχειρησιακή τους αξιοποίηση ως υπόστρωμα για τροφοδοσία δευτερογενών καλλιεργειών προσκρούει σε σημαντικούς περιορισμούς. Πρώτον, η ακατέργαστη βιομάζα τους δεν μπορεί να απορροφηθεί απευθείας από τα ανώτερα φυτά. Απαιτεί ένα επιπλέον, πολύπλοκο στάδιο προ-επεξεργασίας (π.χ. αναερόβια χώνευση) προκειμένου να ορυκτοποιηθεί το άζωτο και να αποφευχθεί ο πολλαπλασιασμός επικίνδυνων παθογόνων μικροβίων. Δεύτερον, παρά τις υψηλές

αποδόσεις σε απλά προσομοιώσεις, η ανάπτυξή τους περιορίζεται αυστηρά από τον χαμηλό ρυθμό απελευθέρωσης φωσφόρου από το πέτρωμα. Τέλος, σε αντίθεση με πολυακραίοφιλα είδη όπως το *Chroococcidiopsis*, η *Anabaena* 7938 δεν διαθέτει ακραία φυσική αντοχή στα τοξικά υπερχλωρικά άλατα, γεγονός που σημαίνει ότι οι θεωρητικές μέγιστες αποδόσεις της ενδέχεται να είναι σημαντικά υπερεκτιμημένες εάν εφαρμοστούν σε πραγματικό, μη αποτοξινωμένο αρεϊκό έδαφος [58]. Ο κύριος περιορισμός τους είναι η έντονη τάση σχηματισμού βιοϋμενίων που αλλάζουν τη δυναμική ρευστών και δυσχεραίνουν τον διαχωρισμό βιομάζας, ενώ δεν παρουσιάζουν φυσική αντοχή στα υπερχλωρικά άλατα σε αντίθεση με τα *Chroococcidiopsis*.

Η αντοχή του κυανοβακτηρίου *Nostoc* sp. HK-01 στο διαστημικό περιβάλλον επικυρώθηκε εν μέρει κατά την αποστολή Tanpopo, όπου αφυδατωμένα κύτταρα εκτέθηκαν στις εξωτερικές συνθήκες του ISS για 1.126 ημέρες, δηλαδή περίπου 3,1 έτη. Ωστόσο, η ερμηνεία του αποτελέσματος απαιτεί προσοχή: τα κύτταρα που παρέμειναν σε σκίαση διατήρησαν υψηλή βιωσιμότητα, ενώ τα δείγματα που εκτέθηκαν άμεσα στην ηλιακή/UV ακτινοβολία καταστράφηκαν σχεδόν ολοκληρωτικά πριν από την ολοκλήρωση του πρώτου έτους. Συνεπώς, το πείραμα τεκμηριώνει σημαντική ικανότητα επιβίωσης σε αφυδατωμένη και προστατευμένη κατάσταση, όχι όμως ανεμπόδιστη αντοχή σε πλήρη έκθεση στο διαστημικό περιβάλλον [59].

Μετά τη συγκριτική αξιολόγηση των οργανισμών, οι πίνακες που ακολουθούν συνοψίζουν τα βασικά βιολογικά υποσυστήματα του Άξονα Α1. Με τον τρόπο αυτό, ο αναγνώστης μπορεί να συσχετίσει κάθε στέλεχος με τον λειτουργικό του ρόλο, τα κύρια πλεονεκτήματά του και τους βασικούς περιορισμούς που επηρεάζουν την αξιοποίησή του σε βιοαναγεννητικά ή Bio-ISRU συστήματα.

Στέλεχος	Τάξη	Κύριος βιότοπος	Δυνατότητες αξιοποίησης πόρων	Ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικό στρες	Βιβλίο γραφικ ή Αναφορά
----------	------	-----------------	-------------------------------	---------------------------------------	-------------------------

Anabaena sp. PCC 7938	Nostocales	—	Δέσμευση αζώτου· υψηλότερη παραγωγικότητα βιομάζας σε προσομοιωτές αρειανού ρεγόλιθου (MGS-1) και σεληνιακού ρεγόλιθου (LMS-1)· ικανότητες αποσάθρωσης πετρωμάτων και έκπλυσης/απελευθέρωσης στοιχείων.	Ανθεκτικότητα στα υπερχλωρικά άλατα / ιόντα υπερχλωρικού, έως 12 mM.	[31], [57]
Arthrospira sp. PCC 8005 (syn. Limnospira indica)	—	Διακλαμικές λήμνες	Υψηλή παραγωγικότητα βιομάζας, με περιεκτικότητα 50–70% σε πρωτεΐνη· δέσμευση CO ₂ και παραγωγή O ₂ με ρυθμό 1,35 mmol/L/h· αξιοποίηση νιτρικών, νιτρωδών, ουρίας, αμμωνίου και νιτρίλων ως πηγών αζώτου· παραγωγή απαραίτητων λιπαρών οξέων και υδρογόνου.	Υψηλή ανθεκτικότητα στην ακτινοβολία, με επιβίωση σε δόσεις 6.400 Gy ακτίνων γάμμα, 2 kGy σωματιδίων Fe και 1 kGy σωματιδίων He· προσαρμοστικότητα σε υψηλή πυκνότητα φωτονιακής ροής, έως 1.700 μmol/m ² /s αναστρέψιμη φωτοαναστολή.	6/10/20 26 11:37:0 0 PM
Nostoc sp. HK-01	—	Χερσαίος	Δέσμευση αζώτου· ανάπτυξη σε προσομοίωση αρεικού ρεγόλιθου (3+ έτη).	Επιβίωση σε Χαμηλή Γήινη Τροχιά (LEO) για 1126 ημέρες· ανθεκτικότητα στο κενό, σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε ακτινοβολία δέσμης ιόντων He, σε UV (172 και 254 nm) και σε ακτίνες γάμμα.	[30], [52], [59]
Chroococcidiopsis sp.	—	Ερήμους ενδολιθικά/λιθοφυτικά	Βιο-αποσάθρωση πετρωμάτων (βιοεσχύλιση)· επιβιώνει σε μείγμα με προσομοιώματα αρεικού εδάφους.	Ανθεκτικότητα στην UVC ακτινοβολία, στο κενό του διαστήματος, σε 15 kGy ακτίνων X, 12 kGy ακτίνων γάμμα, στην αφυδάτωση και στις ακραίες θερμοκρασίες.	[23], [60]
Arthrospira platensis	—	Διακλαμικές λήμνες	Υψηλή παραγωγικότητα βιομάζας (50–70% πρωτεΐνη)· δέσμευση CO ₂ · παραγωγή O ₂ · ανακύκλωση θρεπτικών από ανθρώπινα απόβλητα.	Ανοχή σε υψηλή φωτονιακή ροή· προσαρμογή σε μονοχρωματικό φως (620 nm)· ανοχή σε υψηλό pH.	[61]
Anabaena cylindrica	—	—	Δέσμευση αζώτου· παραγωγή H ₂ (25 μmol/mg Chl a/h)· εξαγωγή μετάλλων (K, Mg, Na, Ca, Fe, Mn, Ni, Zn) από ανάλογα αρεικού βασάλτη.	Επιβίωση σε Χαμηλή Γήινη Τροχιά (LEO) για 1126 ημέρες· ανθεκτικότητα στο κενό, σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε ακτινοβολία δέσμης ιόντων He, σε UV (172 και 254 nm) και σε ακτίνες γάμμα.	[23], [62]
Anabaena variabilis	—	—	Δέσμευση αζώτου· παραγωγή H ₂ (0.8 mmol/L/h)· παρέχει δεσμευμένο άζωτο (N) σε φυτά (π.χ. σιτάρι) σε μέσο ελεύθερο αζώτου.	Ανοχή σε δόση 5 kGy ακτίνων γάμμα χωρίς απώλεια επιβιωσιμότητας.	[52]
Synechocystis sp. PCC 6803	—	—	Δέσμευση άνθρακα (C) από υψηλές συγκεντρώσεις CO ₂ · παραγωγή βιομάζας.	Ανάπτυξη υπό χαμηλή πίεση (33–100 hPa) με υψηλό CO ₂ · ανθεκτικότητα σε UVB και γ-ακτινοβολία (D ₁₀ 0.7 kGy).	[23], [60]

OU-20	Chroococcales	Ποράκιος ασβεστολιθικός γκρεμός	—	Ακραία ανθεκτικότητα· επιβιώνει 10 ημέρες σε LEO, κενό (0.133×10^{-6} kPa), θερμοκρασιακές διακυμάνσεις (-20°C έως $+30^{\circ}\text{C}$), ηλιακή ακτινοβολία (>170 nm) και αφυδάτωση.	[63]
Chroococcidiopsis thermalis	Chroococcidiopsidales	Θερμή λάσπη / Ιαματική πηγή	—	Υψηλή ανθεκτικότητα στα υπερχλωρικά (αναπτύσσεται σε 1.0% / 6.0 mM ClO_4^-)· ανθεκτικό σε ιοντίζουσα/UVC ακτινοβολία και αφυδάτωση.	[58]
Certhiodithrix komarekiana	Oscillatoriales	Σκορδέμια	—	Ανθεκτικό στα υπερχλωρικά (αναπτύσσεται σε 1.0% / 6.0 mM ClO_4^-)· ανθεκτικότητα σε UV ακτινοβολία.	[58]
Leptolyngbya foveolarum	Synechococcales	Έδαφος	—	Ανθεκτικό στα υπερχλωρικά (αναπτύσσεται σε 1.0% / 6.0 mM ClO_4^-).	[58]
Arthrocnemum africanum	Synechococcales	Αλάτι έλος	—	Ανθεκτικό στα υπερχλωρικά (αναπτύσσεται σε 1.0% / 6.0 mM ClO_4^-).	[58]
Gelidocapsa cf. acuminatum	Oscillatoriales	Έδαφος	—	Ανθεκτικό στα υπερχλωρικά (αναπτύσσεται σε 1.0% / 6.0 mM ClO_4^-).	[58]
Cyanobacteria sp. ATCC 51142	—	—	Υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης· δέσμευση αζώτου.	—	[23]

Πίνακας 3-1 Κυανοβακτηριακά στελέχη για βιο-ISRU στον Άρη και υποστήριξη ζωής.

Ενώ ο προηγούμενος πίνακας (Πίνακας 3.1) επικεντρώθηκε στην ανθεκτικότητα των μικροοργανισμών στις ακραίες διαστημικές συνθήκες και στην ικανότητά τους να αξιοποιούν τοπικούς πόρους (ISRU). Για την πλήρη υποστήριξη ενός Βιοαναγεννητικού Συστήματος (BLSS) είναι εξίσου κρίσιμη η στοχευμένη βιοτεχνολογική τους εκμετάλλευση. Ο Πίνακας 3.2 που ακολουθεί, έρχεται να συμπληρώσει αυτή την εικόνα, μετατοπίζοντας την εστίαση από την απλή επιβίωση στην παραγωγική εφαρμογή. Παρουσιάζει πώς συγκεκριμένα μικροβιακά στελέχη μπορούν να λειτουργήσουν ως "βιο-εργοστάσια", είτε μέσω μεταβολικής μηχανικής είτε μέσω της παραγωγής δευτερογενών μεταβολιτών υπό καθεστώς περιβαλλοντικού στρες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον ρόλο τους στην παραγωγή πρόδρομων ενώσεων για βιοπολυμερή. Και στη δράση τους ως ισχυρών βιοδιεγερτών (biostimulants) και παραγόντων βιολογικού ελέγχου (biocontrol) που ενισχύουν την ανάπτυξη, αλλά και την αρχιτεκτονική των ριζών και την υγεία των ανώτερων φυτών στο διαστημικό αγρόκτημα.

Στέλεχος μικροοργανισμού	Τύπος εφαρμογής	Παράγοντας περιβαλλοντικού στρες	Μεταβολικά προϊόντα / δευτερογενείς μεταβολίτες	Παρατηρούμενη επίδραση στην ανάπτυξη ή απόδοση	Αναφορές
Bacillus subtilis (engineered 168 trpC+ and SMY derivatives)	Μεταβολική μηχανική / ISRU για πρόδρομες ενώσεις αρωματικών πολυμερών	Τοξικότητα προϊόντος (εξαρτώμενη από pH) επιβίωση κατά τη διαστημική μεταφορά	παρα-αμινοβενζοϊκό οξύ (pABA)	Μέγιστος τίτλος 3,22 g/L (24 mM) από ακετυλογλυκοζαμίνη απόδοση άνθρακα 12,4%	[64]
Chlamydomonas reinhardtii CC-1690, wt13	ISRU / υπομονάδες συστήματος υποστήριξης ζωής μελέτες συσσωμάτωσης	Μειωμένη πίεση (1.000 έως 700 mbar)	—	Μείωση μ_{max} (από 0,060 h ⁻¹ σε 0,035 h ⁻¹ στα 700 mbar)· αυξημένη πρόσληψη CO ₂ διόγκωση κυττάρων (διάμετροι έως 18 μm) απουσία σχηματισμού συσσωμαμάτων σταθερά στα 700 mbar	[65]
Limnospira indica	Βιοδιέγερση / σύστημα υποστήριξης ζωής	Διαστημικές συνθήκες (προσομοιωμένη μικροβαρύτητα / ISS Biolab)	Εξωπολυσάκχαριτες ακατέργαστοι αντιοξειδωτικοί πολυσάκχαριτες	Προκαλεί μεταβολικές αλλαγές στα φυτά, βελτίωση μεγέθους, βάρους και αριθμού φύλλων	[66]
Anabaena sp.	Βιοδιέγερση	—	Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)	Αναδιάταξη αρχιτεκτονικής ρίζας για αποδοτικότερη πρόσληψη θρεπτικών	[66]

Tolypothrix tjipanasensis	Βιοέλεγχος / αντιμυκητιακή δράση	—	Τζιπαναζόλες (ινδολικά αλκαλοειδή)	Αντιμυκητιακή δράση έναντι φυτοπαθογόνων μυκήτων	[66]
--------------------------------------	--	---	--	---	------

Πίνακας 3-2 Μικροοργανισμοί και βιοτεχνολογικές εφαρμογές για διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής.

Πέραν της έμμεσης βιοτεχνολογικής τους αξίας ως "βιο-εργοστάσια" ή βιοδιεγέρτες, η άμεση ενσωμάτωση των μικροφυκών στη διατροφή του πληρώματος αποτελεί τον κρισιμότερο ρόλο τους. Σε Απομονωμένα και Περιορισμένα Περιβάλλοντα (Isolated and Confined Environments - IACEs), όπως οι διαστημικοί σταθμοί ή οι μελλοντικές πλανητικές βάσεις οι αστροναύτες έρχονται αντιμέτωποι με σοβαρές σωματικές και ψυχολογικές καταπονήσεις. Η ραγδαία απώλεια οστικής μάζας (οστεοπόρωση), η μυϊκή ατροφία, το οξειδωτικό στρες λόγω κοσμικής ακτινοβολίας και η ανοσοκαταστολή είναι μερικές από αυτές. Ο Πίνακας 3.3 που ακολουθεί, εστιάζει αποκλειστικά στο διατροφικό προφίλ και τα άμεσα οφέλη υγείας επιλεγμένων ειδών μικροφυκών. Αναδεικνύει πώς οι οργανισμοί αυτοί δεν καλύπτουν απλώς τις ανάγκες σε μακροθρεπτικά συστατικά, αλλά λειτουργούν ταυτόχρονα ως ισχυρά ιατρικά αντίμετρα (medical countermeasures) για την προστασία του μυοσκελετικού, του ανοσοποιητικού και του νευρικού συστήματος των αστροναυτών, διατηρώντας παράλληλα εξαιρετική προσαρμοστικότητα στις αντίξοες συνθήκες της διαστημικής πτήσης.

Είδος	Διατροφικό προφίλ	Οφέλη ενίσχυσης υγείας	Προσαρμοστικότητα σε απομονωμένα/περιορισμένα περιβάλλοντα	Απαιτήσεις καλλιέργειας	Αναφορές
<i>Spirulina platensis</i>	Πρωτεΐνη 63%, υδατάνθρακες 22%, λιπαρά 2,20%, φυκοκυανίνη >15% ξηρού βάρους και απαραίτητα αμινοξέα.	Μείωση οστικής απώλειας και αύξηση οστικής αντοχής· ανοσορρυθμιστική και αντιφλεγμονώδη δράση μέσω ERK1/2, JNK και p38· πιθανή υποστήριξη ψυχικής υγείας μέσω αύξησης BDNF.	Αναπτύσσεται υπό θρεπτικό και αλατικό στρες η ανάπτυξη σε μικροβαρύτητα εμφανίζεται συγκρίσιμη με γήινες συνθήκες.	Αυτότροφη και μιξότροφη καλλιέργεια κατάλληλη για υπαίθρια πilotική κλίμακα.	[67]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Πρωτεΐνες 55%, υδατάνθρακες 12%, λιπαρά 8,5%, χρωστικές 4,3%, λινελαϊκό, λινολενικό και παλμιτικό οξύ.	Αντικαταθλιπτικές επιδράσεις, μείωση οξειδωτικού στρες στα εγκεφαλικά κύτταρα, πρόληψη δυσλιπιδαιμίας, ρύθμιση μεταβολισμού γλυκόζης και ενίσχυση ανοσολογικής απόκρισης.	Υψηλή φωτοσυνθετική απόδοση στα 150–350 μmol/m ² /s προσαρμογή σε διακυμάνσεις θερμοκρασίας/pH και σε μικροβαρύτητα.	Αυτότροφη, ετερότροφη (σκοτεινή ζύμωση σε κλειστούς ζυμωτήρες) και μιξότροφη καλλιέργεια	[67]

<i>Haematococcus pluvialis</i>	Πρωτεΐνη 25%, υδατάνθρακες 36%, λιπαρά 37% και ασταξανθίνη έως 5%.	Βελτίωση οστικής απώλειας μέσω ρύθμισης OPG/RANKL· νευροπροστασία έναντι καταθλιπτικού μορφής συμπεριφοράς σε συνδυασμό με χλωριούχο λίθιο.	Υψηλή φυσιολογική και μεταβολική πλαστικότητα· επιβίωση σε στρεσογόνους παράγοντες όπως ακτινοβολία και περιορισμός θρεπτικών.	Αυτότροφη καλλιέργεια συνήθως για συσσώρευση δευτερογενών μεταβολιτών (ασταξανθίνη).	[67],[68]
<i>Dunaliella salina</i>	Πρωτεΐνη 40%, υδατάνθρακες 25%, λιπαρά 17% και υψηλή περιεκτικότητα β-καροτενίου έως 10% ξηρού βάρους.	Μείωση βλαβών από UV ακτινοβολία· επαγωγή IL-6 σε πυρηνικά κύτταρα· δυνατότητα παραγωγής υψηλής αξίας εξωπολυσακχαριτών.	Υψηλή αντοχή στην αλατότητα (50–250 mM)· επιβίωση σε διαστημική πτήση με αυξημένη παραγωγή εξωπολυσακχαριτών.	Αυτότροφη καλλιέργεια· ευδοκίμει σε περιβάλλοντα υψηλής αλατότητας.	[67]
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Πλούσια σε λιπίδια, EPA και καθαρισμένα βιοενεργά πεπτίδια.	Τα καθαρισμένα πεπτίδια προάγουν τη διαφοροποίηση οστεοβλαστών· το EPA συμβάλλει στην πρόληψη δυσλιπιδαιμίας και στην ανοσολογική απόκριση.	Αποδοτικοί μηχανισμοί συλλογής φωτός για ταχεία φωτοσύνθεση υπό ασθενές φως.	Αυτότροφη καλλιέργεια θαλάσσιο περιβάλλον	[67]
<i>Phaeodactylum</i>	Υψηλή περιεκτικότητα σε PUFA, EPA και φουκοξανθίνη.	Ανοσοδιεγερτική δράση· πιθανή ηπατοπροστατευτική και αντιδιαβητική δράση της φουκοξανθίνης.	Προσαρμογή σε UV ακτινοβολία και μεταβαλλόμενες φωτεινές εντάσεις σε θαλάσσια περιβάλλοντα.	Αυτότροφη καλλιέργεια· θαλάσσιο είδος.	[67]

Πίνακας 3-3 Διατροφικό προφίλ και άμεσα οφέλη υγείας επιλεγμένων ειδών μικροφυκών

3.1.7 Το Πρόγραμμα MELiSSA: Τεχνολογική Ωριμότητα και Κενά

Το MELiSSA παραμένει ο πιο ολοκληρωμένος κόμβος έρευνας για BLSS. Τα Τμήματα 3, 4α και 5 λειτουργούν στην Πιλοτική Εγκατάσταση MELiSSA για παρατεταμένα διαστήματα. Ο PBR του Τμήματος 4α, με *Limnospira indica*, έχει ήδη περάσει από δοκιμές στον ISS μέσω των πειραμάτων *Arthrospira-B* και *Arthrospira-Ψ* — ένδειξη υψηλής ωριμότητας για το συγκεκριμένο υποσύστημα. Τα ολοκληρωμένα συστήματα σεληνιακής βάσης, όμως, παραμένουν σε χαμηλότερο TRL, περίπου στο 3, επειδή η κλιμάκωση δεν έχει λυθεί [25], [29], [47], [63].

Η τεχνολογική ωριμότητα επιμέρους τμημάτων του MELiSSA δεν μεταφέρεται αυτόματα σε πλήρη υποστήριξη πληρώματος. Το κρίσιμο σημείο μένει ανοιχτό και είναι η κλιμάκωση. Η κλιμάκωση δεν αφορά μόνο μεγαλύτερο όγκο αλλάζει τη διεύθυνση φωτός, τη μεταφορά CO₂/O₂, τη θερμική διαχείριση, την ανάδευση και τον σχηματισμό βιοϋμενίων. Ο φωτοβιοαντιδραστήρας της Πιλοτικής Εγκατάστασης MELiSSA λειτουργεί σε συνολικό όγκο 83 L, με φωτιζόμενο όγκο 55 L, και έχει δείξει παρατεταμένη λειτουργία. Παρ' όλα αυτά, η παραγωγή οξυγόνου καλύπτει μόνο μικρό μέρος των αναγκών ενός ανθρώπου. Η πιλοτική επιτυχία, εδώ, δεν ισοδυναμεί με επιχειρησιακή λειτουργία σε κλίμακα σεληνιακής βάσης [47], [49].

Το μεγαλύτερο χάσμα ωριμότητας βρίσκεται στα Τμήματα 1 και 2: αναερόβια αποικοδόμηση στερεών αποβλήτων και φωτοετερότροφα βακτήρια. Στο Τμήμα 1, η ανάκτηση άνθρακα σε CO₂ παραμένει περίπου στο 15%, ενώ μέρος του φωσφόρου καθιζάνει ή απορροφάται. Έτσι μειώνεται η πραγματική διαθεσιμότητά του. Το Τμήμα 2, με *Rhodospirillum rubrum*, εξετάζεται είτε για αντικατάσταση από Μικροβιακά Ηλεκτροχημικά Κελιά είτε για συνδυασμό με χημική οξείδωση. Τα τμήματα αποικοδόμησης, συνεπώς, υστερούν έναντι των τμημάτων αναγέννησης αέρα και παραγωγής τροφής[25], [69].

Η ανακύκλωση θρεπτικών και το ισοζύγιο μάζας παραμένουν ανοιχτά ζητήματα. Οι Frossard κ.ά. δείχνουν την ανάγκη πλήρους ισοζυγίου για κάθε χημικό στοιχείο στα στάδια αποικοδόμησης οργανικών αποβλήτων, ώστε να κλείσει ο κύκλος του αζώτου. Παράλληλα, τα συστήματα ιονοεπιλεκτικών αισθητήρων IoT για παρακολούθηση θρεπτικών σε ανακυκλωμένα υγρά απόβλητα σε πραγματικό χρόνο δεν έχουν ακόμη ωριμάσει. Δεν είναι σαφές αν οι υπάρχουσες λύσεις μπορούν να λειτουργήσουν σταθερά σε πλήρως κλειστό και μακροχρόνιο BLSS [25], [70].

Στοιχείο συστήματος	Βιολογικός οργανισμός	Λειτουργία	Απαιτούμενες εισροές	Παραγόμενες εκροές	Αναφορές
Βιοαναγεννητικό σύστημα υποστήριξης ζωής (BLSS)	Ανώτερα φυτά και μικροάλγες (π.χ. <i>Chlorella</i> , <i>Spirulina</i>)	Ανταλλαγή αερίων (δέσμευση CO ₂ και παραγωγή O ₂), παραγωγή θερμίδων και καθαρισμός νερού μέσω διαπνοής.	CO ₂ , φως (ηλιακό/LED), νερό, θρεπτικά, συμπεριλαμβανομένης ουρίας από ούρα.	O ₂ , θερμίδες/τροφή, εδώδιμη και μη εδώδιμη βιομάζα, καθαρό διαπνεόμενο νερό, βιοπλαστικά (PHA).	[26], [71]
Βιοαναγεννητικό σύστημα υποστήριξης ζωής (BLSS)	Κυανοβακτήρια	Ανταλλαγή αερίων, αποκατάσταση εδάφους και εξαγωγή θρεπτικών από ρεγόλιθο.	Επιτόπιοι πόροι (ρεγόλιθος), CO ₂ , άζωτο (N ₂), ηλιακή ενέργεια.	Χρήσιμο υπόστρωμα, υδροπονικά θρεπτικά, βιομάζα, O ₂ , δυναμική παραγωγή H ₂ .	[31], [23].
Θάλαμος ανώτερων φυτών	Ανώτερα φυτά (π.χ. σιτάρι,	Αναζωογόνηση αέρα, καθαρισμός νερού και	Υδροπονικά/αεροπονικά διαλύματα, φωτισμός LED (κόκκινο/μπλε/άπω	O ₂ , φρέσκια τροφή, καθαρό διαπνεόμενο	[24], [45]

/ διαστημική γεωργία	γλυκοπατάτα, σαλατικά)	ψυχολογική υποστήριξη πληρώματος.	ερυθρό), κατανομή ροής αέρα.	νερό, αρωματικές ενώσεις.	
Βιοαναγεννητικό σύστημα υποστήριξης ζωής (BLSS)	Λαβυρινθούλο μύκητες (π.χ. Schizochytrium sp.)	Παραγωγή ελαίου μονοκυτταρικών οργανισμών (SCO) πλούσιου σε υψηλής ποιότητας λιπαρά οξέα.	Εκροές αυτότροφων συστημάτων (βιομάζα/O ₂), λύματα βιομάζας.	Έλαιο μονοκυτταρικών οργανισμών (DHA, EPA), πρώτη ύλη για 3D εκτύπωση, καύσιμα και φαρμακευτικά προϊόντα.	[46]
Ανακύκλωση θρεπτικών / διαχείριση αποβλήτων	Μικροοργανισμοί (αερόβια θερμοφιλά, φωτοετερότροφα, νιτροποιητικά βακτήρια)	Αποικοδόμηση άχυρου, ανθρώπινων αποβλήτων και περιττωμάτων εντόμων για ανακύκλωση θρεπτικών.	Στερεά απόβλητα, μη εδώδιμη βιομάζα, ούρα, γκρίζο νερό.	Ανακυκλωμένος άνθρακας (CO ₂), νιτρικά (λίπασμα), καθαρισμός νερού.	[69]
Βιοαναγεννητικό σύστημα υποστήριξης ζωής (BLSS)	Εδώδιμα μανιτάρια / μύκητες	Απελευθέρωση άνθρακα και παραγωγή πρωτεϊνών από μη εδώδιμη βιομάζα.	Μη εδώδιμη φυτική βιομάζα.	Πρωτεΐνες, CO ₂ .	[72]

Πίνακας 3-4 Κύρια στοιχεία και λειτουργικές απαιτήσεις BLSS

3.1.8 Βιολογική ISRU: Από τη Θεωρία στη Μέτρηση

Η εργασία των Verseux κ.ά. (2016) μετατόπισε το ερευνητικό παράδειγμα από τη βιολογική ανακύκλωση αέρα-νερού στην πλήρη αυτονομία μέσω βιο-ISRU — τεκμηριώθηκε πώς κυανοβακτήρια μπορούν να λειτουργήσουν ως «οργανισμοί-πρωτοπόροι» τρεφόμενοι από αρεϊκό ρεγόλιθο και ατμόσφαιρα, παράγοντας βιομάζα για τροφοδοσία ετερότροφων συστημάτων[23].

Οι Concas et.al ανέπτυξαν καλλιέργεια *Synechococcus nidulans* σε 20% αρεϊκό μέσο, δηλαδή σε συνδυασμό ρεγόλιθου και συνθετικών ούρων, με μέγιστη παραγωγικότητα 35 g m⁻³ day⁻¹. Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις ρεγόλιθου η απόδοση μειώθηκε, πιθανώς λόγω τοξικότητας ή οσμωτικού σοκ. Οι Ramalho et.al. εκτιμούν ότι PBR 1 m³ μπορεί να παράγει 2,9 kg ξηρής βιομάζας ανά 30 ημέρες υπό βέλτιστες συνθήκες. Οι Santos de Sousa et.al εξετάζουν *Chroococcidiopsis* sp. CCMEE 010 με προσομοίωμα ρεγόλιθου και ουρία, δείχνοντας το δυναμικό FaRLiP για σκιασμένα περιβάλλοντα. [54], [56], [73].

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων bio-ISRU χρειάζεται μεθοδολογική επιφύλαξη. Πολλές μελέτες βασίζονται σε γήινα προσομοιώματα αρεικού ή σεληνιακού ρεγόλιθου, όπως MGS-1, MGS-1C, MGS-1S, LHS-1, LMS-1 ή JSC Mars-1A. Τα υλικά αυτά αναπαράγουν επιλεκτικά ορυκτολογικά χαρακτηριστικά, όχι όμως πλήρως την τοξικότητα, τη μικροδομή, τη διαλυτότητα θρεπτικών και τη χημική ετερογένεια του πραγματικού εξωγήινου υποστρώματος. Σε αρκετές περιπτώσεις τα υπερχλωρικά απουσιάζουν ή προστίθενται τεχνητά. Τι σημαίνει αυτό για πραγματική καλλιέργεια στον Άρη ή στη Σελήνη; [31], [62]

Σε επίπεδο παραγωγής O_2 , οι Kruyer et.al εκτιμούν ότι ένα bio-ISRU σύστημα παραγωγής 10 τόνων καυσίμου 2,3-βουτανοδιόλης θα παρήγαγε 43,81 τόνους O_2 μέσα σε 500 αρεϊκές ημέρες. Το μέγεθος υπερβαίνει κατά πολύ τους περίπου 2 τόνους O_2 που απαιτούνται για την αναπνοή πληρώματος έξι ατόμων στο ίδιο διάστημα. Πειράματα αναγέννησης αέρα με *Limnospira indica* σε ούρα έδειξαν σταθερά επίπεδα O_2 στο 20,3% σε κλειστό κύκλωμα. Στον PBR νιτροποίησης MELiSSA αναφέρονται $2,7 \text{ g h}^{-1}$ παραγωγής O_2 , $2,3 \text{ g h}^{-1}$ κατανάλωσης CO_2 και απόδοση αζώτου $Y_{N/X} = 0,09 \text{ g N-NO}_3 \text{ ανά g βιομάζας}$ [29], [49], [72].

Στην οικονομική βιωσιμότητα, το μοντέλο Ισοδύναμης Μάζας Συστήματος των Ramalho κ.ά. δείχνει νεκρό σημείο απόδοσης σε 4,9 έτη λειτουργίας έναντι συνεχούς τροφοδοσίας από τη Γη. Η πλήρης αυτονομία, δηλαδή 100%, θεωρείται ανέφικτη λόγω διαρροών και φθορών. Ποσοστά πάνω από 80% εμφανίζονται εφικτά. Ο βασικός λειτουργικός περιορισμός παραμένει πιο πεζός, η ταχεία απελευθέρωση φωσφόρου από τον ρεγόλιθο [73] [31], [62]. Η εκτίμηση αυτή είναι χρήσιμη ως σημείο αναφοράς. Δεν πείθει πλήρως όμως, η ανάγνωσή της ως επιχειρησιακού χρονοδιαγράμματος. Τα μοντέλα ESM στηρίζονται σε παραδοχές για ρυθμούς απελευθέρωσης θρεπτικών από τον ρεγόλιθο, διαχωρισμό αερίων και σταθερότητα βιολογικής παραγωγής. Αυτές οι παραδοχές δεν έχουν επικυρωθεί σε πλήρες διαστημικό περιβάλλον. Το όριο των 4,9 ετών λειτουργεί καλύτερα ως θεωρητική ένδειξη βιωσιμότητας [73].

Οι Khoshtinat et.al προτείνουν βιο-ορυκτοποίηση (biomineralization) για παραγωγή υλικών δόμησης χρησιμοποιώντας αρεϊκό βασάλτικο ρεγόλιθο, ανθρώπινα ούρα, CO_2 και φως, μέσω συγκαλλιέργειας *Chroococcidiopsis* και *Sporosarcina pasteurii*. Ο αυτόνομος έλεγχος μέσω rovers ή drones που εγχέουν ρομποτικά μικροοργανισμούς και θρεπτικά διαλύματα στον ρεγόλιθο αποτελεί κεντρική πρόταση για κατασκευή 3D εκτύπωσης.

Αντίστοιχα, οι Kruyer et.al προτείνουν κυανοβακτήρια *E. coli* διαδρομή για παραγωγή 2,3-βουτανодиόλης ως καύσιμο επιστροφής από Άρη. Οι Menezes et.al τεκμηριώνουν σημαντικά πλεονεκτήματα βιολογικών τεχνικών έναντι μη-βιολογικών για αποστολές 916 ημερών στον Άρη [32], [74], [75].

Μικροβιακό είδος / οργανισμός	Σύστημα καλλιέργειας / διαμέρισμα	Μέσο / πηγή θρεπτικών	Τρόπος λειτουργίας	Παραγωγικότητα βιομάζας (mg L ⁻¹ d ⁻¹)	Αναφορές
<i>Limnospira indica</i> (PCC 8005)	Κλειστός φωτοβιοαντιδραστήρας gas-lift (83 L)	Προσαρμοσμένο μέσο Zarrouk	Συνεχής λειτουργία (ρυθμός αραίωσης 0,48 d ⁻¹)	430	[49], [76]
<i>Limnospira indica</i>	Φωτοβιοαντιδραστήρας CSTR	Εμπλουτισμένα νιτροποιημένα ούρα (P, Mg, Ca, Fe, EDTA, ιχνοστοιχεία)	Συνεχής λειτουργία (HRT 3 ημέρες)	1100	[48]
<i>Limnospira indica</i> (PCC 8005)	Ανοικτή δεξαμενή τύπου raceway (100 L)	Προσαρμοσμένο μέσο Zarrouk	Ασυνεχής λειτουργία (συνεχής φωτισμός)	21	[48]
<i>Limnospira indica</i>	Φιάλες Erlenmeyer ασυνεχούς καλλιέργειας	Νιτροποιημένα ούρα εμπλουτισμένα με P, Mg, Ca, Fe, EDTA και ιχνοστοιχεία	Ασυνεχής λειτουργία	—	[52]
<i>Arthrospira platensis</i> / <i>maxima</i> (Spirulina)	Κλειστός βιοαντιδραστήρας	Αρειανό περιβάλλον / ανακύκλωση αποβλήτων	Συνεχής λειτουργία	1000	[77]
<i>Arthrospira platensis</i> (PCC 8005)	Τμήμα MELiSSA 4A	Τροποποιημένο μέσο Zarrouk	Κύκλος 12 ωρών φωτός/σκότους	—	[49]
<i>Chlorella vulgaris</i> (SAG 211-11b)	Ανοικτή δεξαμενή τύπου raceway (100 L)	Προσαρμοσμένο Bold Basal Medium (BBM)	Συνεχής λειτουργία (ρυθμός αραίωσης 0,1 d ⁻¹)	26	[26]
<i>Chlorella vulgaris</i> (SAG 211-11b)	Ανοικτή δεξαμενή τύπου raceway (100 L)	Προσαρμοσμένο Bold Basal Medium (BBM)	Ασυνεχής λειτουργία	48	[26]

			(συνεχής φωτισμός)		
Anabaena sp. PCC 7938	Αναερόβιος χωνευτής (εμβόλιο 2)	Ελάχιστο θρεπτικό μέσο ή προσομοίωμα αρεϊκού ρεγόλιθου (MGS-1) σε νερό	Ασυνεχής λειτουργία (12 ημέρες)	—	[31]
Synechococcus nidulans	Ορθογόνιες διαφανείς φιάλες 75 cm ³ με αεριζόμενο πάμα ή προσομοιωμένος αρεϊκός θόλος	40% v/v αρειανό μέσο (εκχύλισμα ρεγόλιθου + συνθετικά ούρα) και 60% v/v Z-medium	Ασυνεχής λειτουργία (10–14 ημέρες)	29.9	[54]
Limnospira indica PCC8005 P3	Μικρογραφικός PBR (γήινο μοντέλο)	Μέσο Zarrouk (τροποποιημένο)	Ημισυνεχής λειτουργία (ρυθμός αραίωσης 0,6 mL h ⁻¹)	192-384	[49]
Anabaena sp. PCC 7938	Φωτοβιοαντιδραστήρας airlift	Αρειανός ρεγόλιθος (MGS-1), ατμόσφαιρα N ₂ /CO ₂	Ασυνεχής λειτουργία (πειράματα 30 ημερών)	96.6	[73]
Methanobacterium thermoautotrophicum	Βιοαντιδραστήρας CSTR	H ₂ και CO ₂ (προερχόμενα από ISRU)	Συνεχής λειτουργία	204100	[60]
Cupriavidus necator (Ralstonia eutropha)	Βιοαντιδραστήρας CSTR	H ₂ , O ₂ , CO ₂	Συνεχής λειτουργία	37200	[60]
Synechocystis sp. PCC 6803 (engineered)	Φορητός βιοαντιδραστήρας (2 L)	CO ₂ , H ₂ , N ₂ (ατμοσφαιρικά)	Ασυνεχής λειτουργία (κατ' απαίτηση)	230	[75]
Nitrosomonas (AOB)	Βιοαντιδραστήρας βιοϋμενίου με αερισμό μέσω μεμβράνης (MABR)	Νιτροποιημένα ανθρώπινα ούρα (εκροή MEC)	Συνεχής λειτουργία	—	[37]
Limnospira indica PCC8005 P3	Κλειστός PBR ή ασυνεχείς καλλιέργειες (προσομοίωση μεταφοράς προς Άρη)	Μέσο Zarrouk	Ασυνεχής λειτουργία (2 εβδομάδες)	90-121	[49], [76]
Arthrospira platensis	Σύστημα ανάπτυξης βιοϋμενίου ή αιωρούμενη	Αρειανές πηγές (CO ₂ , ηλιακό φως, H ₂ O) +	Συνεχής λειτουργία	6540-6640	[78]

	καλλιέργεια (σάκοι LDPE)	μεταφερόμενα θρεπτικά			
Microalgae	Αντιδραστήρας μικροαλγών (Σεληνιακή Βάση, Στάδιο II)	CO ₂ ανθρώπινης αναπνοής + σεληνιακός πάγος	Συνεχής λειτουργία (σταθερή κατάσταση)	387000	[26]
Αναερόβια γένη (Geobacter, Alcaligenes)	Μικροβιακό κελί ηλεκτρόλυσης (MEC2)	Πραγματικά ανθρώπινα ούρα (αραιωμένα)	Συνεχής λειτουργία	—	[37]
Synechococcus sp. PCC 7335	Θάλαμοι προσομοίωσης ατμόσφαιρας (ASC)	BG11: ASNIII (1:1)	Batch (7 days)	22.5	[79]
Euglena gracilis	Δεξαμενή 11 L / δεξαμενή 1.450 mL (AQUACELLS)	Εξωτερικά μέσα / απόβλητα ψαριών (αμμώνιο)	Ασυνεχής λειτουργία (μακράς διάρκειας)	—	[72]
Chlorella vulgaris	Επίπεδος airlift PBR (FPA) ή σωληνωτός airlift PBR	—	Συνεχής λειτουργία	80-4000	[26]
Heterotrophic Bacteria / Microorganisms	Βιοαντιδραστήρας υγρών αποβλήτων (CELSS)	Ούρα + υγρά απόβλητα υγιεινής/καθαρισμού + συμπύκνωμα αέρα	Συνεχής λειτουργία	—	[80]
Thermophilic Anaerobic Bacteria	Βιοαντιδραστήρας στερεών αποβλήτων (Τμήμα 1)	Κόπρανα + μη εδώδιμα μέρη φυτών	Αναερόβια χώνευση	—	[69]
Arthrospira sp. PCC 8005	Κλειστός γυάλινος PBR (2 L) ή κυλινδρικός PBR	Zarrouk medium	Συνεχής λειτουργία	—	[49], [76]
Limnospira indica (PCC 8005)	Φωτοβιοαντιδραστήρας μεμβράνης ISS Biolab	Τροποποιημένο μέσο Zarrouk	Ασυνεχής λειτουργία (διαστημική πτήση)	—	[49], [76]
Synechococcus sp. PCC 7002	Φιάλη Erlenmeyer 250 mL / φίλτρο βασαλτικού πετρώματος	Προσομοίωμα αλμυρού νερού (BG-11 + 0,343 mol L ⁻¹ NaCl)	Στατική λειτουργία	—	[81]

Chlorella vulgaris	PBR@LSR (πείραμα ISS) ή καλλιέργεια μικτής ροής	—	Ασυνεχής ή συνεχής λειτουργία	—	[26]
Limnospira indica	Καλλιέργεια μικτής ροής / καλλιεργητής άλγης	—	Συνεχής λειτουργία / ροή	—	[26], [76]]
Anabaena cylindrica	Φιάλες 250 mL (χαμηλή πίεση)	BG-11 ή BG11-0 / αρειανό 100% CO ₂	—	—	[82]
Synechocystis sp. PCC 6803	Σφαιρικές φιάλες στρογγυλού πυθμένα (χαμηλή πίεση)	BG-11 / 100% CO ₂	—	—	[62]

Πίνακας 3-5 Ενδεικτικοί δείκτες απόδοσης σε βιοαναγεννητικά συστήματα και ανάκτηση πόρων

3.1.9 Ανθεκτικότητα στις Εξωγήινες Καταπονήσεις

Η έκθεση σε ιοντίζουσα και υπεριώδη ακτινοβολία προκαλεί βλάβες DNA και υπερπαραγωγή ελεύθερων ριζών οξυγόνου (ROS). Στο *Arthrospira* sp. PCC 8005, η αντίσταση βασίζεται σε αντιοξειδωτική δράση γλουταθειόνης (GSH) και υπεροξυρεδοξίνης αντί κλασικών ενζύμων (π.χ. καταλάση). Σε υψηλές δόσεις παρατηρείται άμεση καταστολή φωτοσύνθεσης και μείωση φωτοσυνθετικών χρωστικών (φυκοκυανίνη), μηχανισμός περιορισμού περαιτέρω παραγωγής ROS από το Φωτοσύστημα II[30], [83], [84].

Σε *Chlorella vulgaris* υπό ακτινοβολία X παρατηρήθηκε αναδιαμόρφωση σύνθεσης λιπιδίων (αλλαγές κορεσμένων/ακόρεστων λιπαρών οξέων) ως στρατηγική προσαρμογής. Σε χαμηλές δόσεις χρόνιας ακτινοβολίας, καταγράφηκε φαινόμενο ορμής (hormesis) — η μικρή δόση διεγείρει προσωρινά παραγωγή βιομάζας και φωτοσυνθετική ικανότητα [84], [85].

Σε επίπεδο φυσικής προστασίας, *Chroococcidiopsis* και *Nostoc* σχηματίζουν βιοϋμένια πολλαπλών στρωμάτων όπου τα νεκρά κύτταρα ανώτερης στιβάδας λειτουργούν ως φυσική «ασπίδα». Ενισχύεται η προστασία από εξωκυτταρικά πολυμερή (EPS) και ειδικές χρωστικές (σκυτονεμίνη, αμινοξέα MAAs). Κρίσιμης σημασίας είναι η επικύρωση γενωμικής σταθερότητας από τους Napoli κ.ά. Απουσία αυξημένων γενωμικών παραλλαγών σε *Chroococcidiopsis* εκτεθειμένο σε συνθήκες τύπου Άρη εκτός ISS. Ο υπό χαμηλή πίεση N₂/CO₂ ατμόσφαιρα τύπου Άρη έλεγχος αποδείχθηκε κατάλληλος για κυανοβακτήρια βιο-ISRU. Ο αντίκτυπος μειωμένης πίεσης στην ανάπτυξη

Chlamydomonas reinhardtii για CELSS PBR μελετήθηκε επίσης ως προς παραγωγή O_2 και κατανάλωση CO_2 . Η απόκριση στα υπερχλωρικά άλατα εδάφους του Άρη αξιολογήθηκε σε 17 στελέχη κυανοβακτηρίων: τα *Chroococcidiopsis* εμφάνισαν σαφώς υψηλότερη αντοχή. Αντίστοιχα, η επιβίωση νηματοειδών κυανοβακτηρίων σε συνδυαστικό στρες αφυδάτωσης και UV-B αξιολογήθηκε για τρία είδη [58], [59], [65], [83], [86].

Τα υπερχλωρικά άλατα αποτελούν κρίσιμο περιοριστικό παράγοντα για οποιοδήποτε σενάριο άμεσης χρήσης αρεϊκού υποστρώματος. Στο βιβλιογραφικό σώμα αναφέρονται μέσες συγκεντρώσεις περίπου 0,6% κ.β. στην επιφάνεια του Άρη, ενώ πειραματικές δοκιμές με 0,25–1,0% υπερχλωρικού μαγνησίου έδειξαν αναστολή ανάπτυξης στα περισσότερα κυανοβακτήρια. Μόνο συγκεκριμένα στελέχη, όπως *Chroococcidiopsis thermalis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Arthronema africanum*, *Geitlerinema* cf. *acuminatum* και *Cephalothrix komarekiana*, εμφάνισαν επιβίωση στην υψηλότερη συγκέντρωση. Αυτό σημαίνει ότι η bio-ISRU δεν μπορεί να βασιστεί γενικά σε οποιοδήποτε κυανοβακτήριο, αλλά απαιτεί αυστηρή επιλογή στελεχών, προεπεξεργασία υποστρώματος ή μηχανισμούς μείωσης τοξικότητας [58].

3.1.10 Ενσωμάτωση BLSS–ECLSS: Η Υβριδική Αναγκαιότητα

Η ενσωμάτωση BLSS σε ECLSS αντιμετωπίζει θεμελιώδη λειτουργική πρόκληση — οι ζωντανοί οργανισμοί δεν μπορούν να ενεργοποιηθούν/απενεργοποιηθούν στιγμιαία για να ακολουθήσουν τις απότομες διακυμάνσεις αναγκών πληρώματος, καθιστώντας αναγκαία υβριδική αρχιτεκτονική. Τα φυσικοχημικά ECLSS λειτουργούν επικουρικά, εξισορροπώντας συγκεντρώσεις αερίων, παρέχοντας εφεδρεία κατά την εκκίνηση και απομακρύνοντας VOCs που παράγουν βιογενώς τα φυτά και οι μικροοργανισμοί [71].

Η διαχείριση VOCs, αιθυλένιο, ισοπρένιο, τοξικές ενώσεις, αποτελεί ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα: μπορεί να φτάσουν τοξικά επίπεδα για το πλήρωμα, να βλάψουν την ανάπτυξη φυτών ή να αδρανοποιήσουν χημικούς καταλύτες φίλτρων. Προτείνεται χρήση φωτοκαταλυτικής οξείδωσης χαμηλής θερμοκρασίας ($TiO_2/UV-C$) ή υπερμαγγανικού καλίου για διάσπαση VOCs χωρίς εξάντληση φίλτρων ECLSS [71].

Πρόσθετο δομικό πρόβλημα αποτελεί το «έλλειμμα άνθρακα»: οι ποσότητες CO_2 που εκπνέει το πλήρωμα δεν επαρκούν για τους ρυθμούς φωτοσύνθεσης που απαιτούνται για κάλυψη θερμιδικών αναγκών, καθιστώντας αναγκαία την άντληση CO_2 από εξωτερικές πηγές, π.χ. αρεϊκή ατμόσφαιρα. Για σταθεροποίηση ανταλλαγής αερίων O_2/CO_2 ,

προτείνεται κλιμακωτή καλλιέργεια φυτών (staggered cultivation) με ομάδες διαφορετικών σταδίων ωρίμανσης για εξομάλυνση διακυμάνσεων αναπνοής/φωτοσύνθεσης[71].

Ο Kane και Shasteen ορίζουν χρονοδιάγραμμα ενσωμάτωσης BLSS-ECLSS σε 10–20 χρόνια για το Artemis, εντοπίζοντας ως κρίσιμα εμπόδια, έλλειψη πλήρως κλειστών συστημάτων καλλιέργειας για χαρτογράφηση παραγωγής ιχνοαερίων, απουσία αξιόπιστων μοντέλων πρόβλεψης πυκνότητας φύτευσης υπό διάφορα φάσματα LED, εντατικές απαιτήσεις ενέργειας, όγκου και διαχείρισης θερμότητας. Η ανάγκη κατασκευής ρομποτικών βραχιόνων, μεταφερόμενων ραφιών και αυτοματοποιημένων συστημάτων για επικοινωνία, κλάδεμα, μεταφύτευση, συγκομιδή και καθαρισμό εγκαταστάσεων αναφέρεται ρητά [71].

3.1.11 Μαθηματική Μοντελοποίηση, Ψηφιακοί Δίδυμοι και Αυτόνομος Έλεγχος

Οι Roughton et.al. ανέπτυξαν μηχανιστικό μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας και κινητικής μέσω Γραμμικής Θερμοδυναμικής Μη Αντιστρεπτών Διαδικασιών (LTIP) για τον PBR *Limnospira indica* στο MELiSSA, εφαρμόσιμο στην επίγεια Πιλοτική Εγκατάσταση και στον ISS. Οι Maton κ.ά. χρησιμοποίησαν Ανάλυση Μεταβολικής Ροής (MFA) για κατασκευή μεταβολικών δικτύων ενδιάμεσου μεγέθους, παρέχοντας υπολογιστικά αποδοτικά μοντέλα βιοαντιδραστήρων. Οι Ramalho κ.ά. ανέπτυξαν μοντέλα ESM για ποσοτική αξιολόγηση αποδοτικότητας βιο-ISR. Ο Semyonov αναπτύσσει μαθηματικό μοντέλο αλγών για κλειστό κύκλωμα O_2 - CO_2 συγκρίνοντας ποσοτικές μεθόδους ανάλυσης. Οι Kane και Shasteen αναφέρονται στην ανάγκη ψηφιακών διδύμων μέσω όρασης υπολογιστών (computer vision) για παρακολούθηση ανάπτυξης φυτών σε πραγματικό χρόνο [29], [71], [76], [87].

Τα υπάρχοντα μοντέλα έχουν σαφή όρια αξιοπιστίας. Είναι ακριβή σε σταθερές συνθήκες, αλλά δυσκολεύονται όταν αλλάζουν pH, μερική πίεση CO_2 , μεταφορά μάζας ή καθεστώς φωτισμού. Δεν είναι σαφές αν η καλή προσαρμογή σε ένα πειραματικό σύνολο δεδομένων αρκεί για ασφαλή πρόβλεψη σε ένα BLSS μεγάλης διάρκειας. Το πρόβλημα δεν είναι μόνο στατιστικό — είναι βιολογικό και φυσικοχημικό μαζί [29], [43], [45].

Αναφορικά με τον αυτόνομο έλεγχο, το βιβλιογραφικό σώμα προσδιορίζει σαφώς τα στοιχεία που απαιτούν αυτοματοποίηση, συστήματα άρδευσης και ελέγχου θρεπτικών, παρακολούθηση υγείας φυτών, και καθημερινές αγροτικές εργασίες (επικονίαση, κλάδεμα, συγκομιδή, καθαρισμός). Για PBR, απαιτούνται αυτόνομα συστήματα παρακολούθησης pH, θερμοκρασίας και διαλυμένου O_2 με έξυπνο έλεγχο ανατροφοδότησης. Τεχνολογίες IoT και δίκτυα κατανεμημένων αισθητήρων για ανάλυση βιοχημικών δεδομένων μέσω πολυαισθητηριακών φίλτρων Kalman αναφέρονται ως απαραίτητα. Τεχνικές υπερφασματικής απεικόνισης (hyperspectral imaging) για δημιουργία βάσεων δεδομένων εκπαίδευσης αλγορίθμων βαθιάς μάθησης για πρόωμη ανίχνευση στρες φυτών αναπτύσσονται σε TRL 3–5 για διαστημικές εφαρμογές. Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για βελτιστοποίηση δοσολογίας σε κατασκευές βιο-ενίσχυσης στον Άρη προτείνονται επίσης. Η εφαρμογή προσομοιωμένης μικροβαρύτητας για κυανοβακτήρια MELiSSA μελετήθηκε επίσης επίγεια ως πλατφόρμα επικύρωσης πριν πτήση. Μέσα σε αναλογικών αποστολών, η δυναμική μικροβιώματος κατά την HI-SEAS IV χαρτογράφησε αλλαγές σε περιορισμένο ανθρωπογενές περιβάλλον, παρέχοντας πολύτιμες ενδείξεις για μακροχρόνιες αποστολές [24], [70], [71], [88].

3.1.12 Πέντε Κεντρικά Ευρήματα για τον Σχεδιασμό Αυτόνομων Συστημάτων

Η συνθετική ανάλυση του Άξονα A1 αναδεικνύει πέντε κεντρικά ευρήματα που τροφοδοτούν τον σχεδιασμό αρχιτεκτονικής στα Κεφάλαια 4–6:

1. Κυριαρχία μικροοργανισμών έναντι ανώτερων φυτών. Για αυτόνομα BLSS, οι PBR κυανοβακτηρίων-μικροαλγών υπερτερούν ως προς δείκτη συγκομιδής (~100%), αποδοτικότητα, ευκολία αυτοματοποίησης και ανθεκτικότητα. Δεν υποκαθιστούν τα ανώτερα φυτά, αλλά αποτελούν τον πυρήνα αναγέννησης αέρα

2. Βιο-ISRU ως προϋπόθεση μακροπρόθεσμης αυτονομίας. Ποσοστά αυτονομίας >80% είναι εφικτά εντός περίπου 4,9 ετών λειτουργίας. Κυανοβακτήρια όπως η *Anabaena* και το *Chroococcidiopsis* αποτελούν τους πλέον ελπιδοφόρους οργανισμούς για αξιοποίηση ρεγόλιθου, CO_2 και ούρων χωρίς εξωτερικές εισροές.

3. Υβριδική αρχιτεκτονική BLSS+ECLSS ως αναγκαιότητα. Τα βιολογικά συστήματα δεν μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τα φυσικοχημικά. Ο ρόλος των ECLSS ως εφεδρείας, ρυθμιστή VOCs και εξισορροπιστή αερίων παραμένει αναντικατάστατος.

4. Χάσμα ωριμότητας στα τμήματα αποικοδόμησης. Ενώ τα τμήματα C3 και C4α (MELiSSA) βρίσκονται σε TRL 5–7, τα C1 και C2 υστερούν (TRL ~3), αποτελώντας το κρίσιμο εμπόδιο κλεισίματος κύκλου

5. Αυτόνομος έλεγχος: ώριμος στη Γη, ανεπαλήθευτος στο διάστημα. IoT, υπερφασματική απεικόνιση και μηχανική μάθηση βρίσκονται σε TRL 3–5 για διαστημικές εφαρμογές. Κανένα ολοκληρωμένο σύστημα δεν έχει επαληθευτεί σε πλήρεις συνθήκες ακτινοβολίας-μικροβαρύτητας — το θεμελιώδες κενό που αντιμετωπίζει η παρούσα διατριβή.

3.2 Άξονας A2: Διαστημική Γεωργία και Τεχνολογία — IoST, Τεχνητή Νοημοσύνη και Αυτόνομος Έλεγχος

Ο δεύτερος θεματικός άξονας συγκεντρώνει 15 δημοσιεύσεις που ενσωματώνουν τεχνολογίες Διαδικτύου Διαστημικών Αντικειμένων (Internet of Space Things, IoST), τεχνητής νοημοσύνης, αυτοματισμού και παρακολούθησης σε διαστημικά ή διαστημικά-αναλογικά συστήματα καλλιέργειας. Αποτελεί τον άξονα με τη μεγαλύτερη άμεση συνάφεια με τον σχεδιασμό αρχιτεκτονικής αυτόνομων συστημάτων των επόμενων κεφαλαίων, καθώς τεκμηριώνει τόσο τις διαθέσιμες τεχνολογικές λύσεις όσο και τα κρίσιμα κενά επαλήθευσής τους σε πραγματικές διαστημικές συνθήκες.

Η ανάλυση του βιβλιογραφικού σώματος αποκαλύπτει δύο διακριτά θεματικά στρώματα, αφενός δημοσιεύσεις που εστιάζουν στην αρχιτεκτονική δικτύων και λογισμικού (IoST, cloud, edge computing), αφετέρου δημοσιεύσεις που επικεντρώνονται στο φυσικό hardware και τα συστήματα αισθητήρων. Ορισμένα άρθρα υλοποιούν ολοκληρωμένα end-to-end συστήματα που καλύπτουν και τα δύο επίπεδα, από τον αισθητήρα έως τον ενεργοποιητή και το υπολογιστικό νεφός. Κανένα από τα νέα επίγεια ή αναλογικά συστήματα του άξονα δεν έχει επαληθευτεί ως ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική αυτόνομης καλλιέργειας σε πραγματικό διαστημικό περιβάλλον. Η διατύπωση αυτή διακρίνει ρητά τον ISS από αναλογικές εγκαταστάσεις όπως το EDEN ISS: οι δεύτερες

παρέχουν επιχειρησιακά χρήσιμα δεδομένα, αλλά δεν ισοδυναμούν με άμεση διαστημική δοκιμή [89], [90], [91].

3.2.1 Αρχιτεκτονική IoST και Διαπλανητική Επικοινωνία

Η θεωρητική θεμελίωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου Διαδικτύου Διαστημικών Αντικειμένων παρουσιάζεται από τους Priyadarshini κ.ά., οι οποίοι προτείνουν μια πέντε-επίπεδη αρχιτεκτονική νέφους — Δημόσιο Δίκτυο (με υπηρεσίες DNS, Firewall και Load Balancers), Πάροχος Cloud (IaaS, PaaS, SaaS, μητρώο συσκευών), Εταιρικό Δίκτυο, Επίγειος Σταθμός και Διαδιαστημική Επικοινωνία. Το τελευταίο επίπεδο αποτελείται από ενδιάμεσους δορυφόρους μετάδοσης δεδομένων (Data Transmission Satellite Level, DTSL) οργανωμένους σε τοπολογίες πλέγματος και δακτυλίου για μείωση καθυστέρησης και αποφυγή απώλειας πληροφοριών[92].

Το πρόβλημα της καθυστέρησης (latency) στην επικοινωνία Γης-Άρη, που μπορεί να φτάσει σε τιμές αρκετές ώρες, αναγνωρίζεται ρητά ως κρίσιμη πρόκληση. Η αντιμετώπισή της προτείνεται μέσω δύο συμπληρωματικών προσεγγίσεων: αφενός μέσω edge computing στους ενδιάμεσους δορυφόρους, οι οποίοι επεξεργάζονται τοπικά τα δεδομένα πριν τα αποστείλουν, και αφετέρου μέσω αυτόνομων αλγορίθμων λήψης αποφάσεων που επιτρέπουν στο σύστημα να λειτουργεί ανεξάρτητα από συνεχή επικοινωνία με τη Γη. Μέσα σε αυτό, οι Janairo κ.ά. υλοποιούν ένα μοντέλο Space-to-Edge-to-Cloud με βάση τον νανοδορυφόρο ARCHER 2U CubeSat, επιτυγχάνοντας επεξεργασία δεδομένων καλλιέργειας εν πτήση (on-flight) χωρίς αναμονή για την ολοκλήρωση της αποστολής [92], [93].

Για την αντιμετώπιση της έξυπνης κατανομής υπολογιστικού φόρτου σε κατανεμημένα δίκτυα IoT, οι Metelo κ.ά. παρουσιάζουν το περιβάλλον προσομοίωσης PeersimGym, το οποίο εκπαιδεύει πράκτορες Πολυ-πρακτορικής Ενισχυτικής Μάθησης (Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL) για αυτόνομη δρομολόγηση εργασιών, αποφασίζοντας τοπική επεξεργασία ή μεταφορά σε κοντινό κόμβο, με στόχο την ελαχιστοποίηση καθυστέρησης και κατανάλωσης ενέργειας. Το σύστημα είναι πλήρως ανοικτού κώδικα με δημόσιο αποθετήριο στο GitHub και αποτελεί άμεσα αναπαραγώγιμο εργαλείο για ερευνητική χρήση [94].

3.2.2 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και ενδιάμεσο λογισμικό

Η ανάλυση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας αποκαλύπτει μια αρχιτεκτονική πολλαπλών στρωμάτων όπου κάθε πρωτόκολλο εκτελεί συγκεκριμένο και συμπληρωματικό λειτουργικό ρόλο. Για τοπική ασύρματη επικοινωνία μεταξύ μικροελεγκτών (peer-to-peer), αξιοποιείται το πρωτόκολλο ESP-NOW λόγω χαμηλής καθυστέρησης και απλότητας χωρίς υποδομή Wi-Fi. Για τη μετάδοση δεδομένων στο σύννεφο χρησιμοποιείται το MQTT μέσω AWS IoT Core, ενώ για επικοινωνία πραγματικού χρόνου με τελικούς χρήστες αξιοποιείται το WebSocket. Το οποίο, σε ρητή σύγκριση με το παραδοσιακό HTTP, αποδεικνύεται ανώτερο λόγω αμφίδρομης συνεχούς επικοινωνίας χωρίς διαρκή ανανέωση σύνδεσης, μειώνοντας καθυστέρηση και κατανάλωση εύρους ζώνης. Για ασύρματα δίκτυα χαμηλής ισχύος σε αυτόματα υδροπονικά συστήματα αναφέρεται το ZigBee, ενώ η αρχιτεκτονική IoST των Priyadarshini βασίζεται σε πλήρη στοίβα TCP/IP με HDLC, ATM και DVB στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων [93], [92].

Αξιοσημείωτη είναι η απουσία συγκριτικής αξιολόγησης (benchmarking) μεταξύ πρωτοκόλλων στη βιβλιογραφία. Η πλειοψηφία των μελετών αναθέτει στο κάθε πρωτόκολλο ξεχωριστό ρόλο εντός της ίδιας αρχιτεκτονικής αντί να τα συγκρίνει συστηματικά. Η επιλογή αυτή είναι λειτουργικά αιτιολογημένη αλλά αφήνει ανοιχτό το ερώτημα της βέλτιστης στοίβας πρωτοκόλλων για αποστολές μεγάλης καθυστέρησης [92], [93].

3.2.3 Τοπίο πρωτοκόλλων και λειτουργική τοποθέτηση

Κρίσιμο σημείο για την ορθή ανάγνωση της βιβλιογραφίας είναι ότι πρωτόκολλα όπως το MQTT, το CoAP, το TCP/IP, το ZigBee, η δικτύωση ανθεκτική σε καθυστέρηση (DTN), τα πακέτα διαστήματος (Space Packet) και το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων CFDP δεν αποτελούν εναλλακτικές λύσεις για το ίδιο πρόβλημα. Ανήκουν σε διαφορετικά λειτουργικά επίπεδα και μπορούν να χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά. Το MQTT είναι ελαφρύ πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων δημοσίευσης/συνδρομής με τρία επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, η κανονική όμως λειτουργία του προϋποθέτει αξιόπιστο υπόστρωμα μεταφοράς με διατεταγμένη και χωρίς απώλειες σύνδεση· είναι επομένως κατάλληλο κυρίως για τοπική τηλεμετρία και όχι ως μηχανισμός μεταφοράς σε βαθύ διάστημα.

Το CoAP σχεδιάστηκε ειδικά για κόμβους περιορισμένων πόρων και δίκτυα χαμηλής ισχύος, με μικρή κεφαλίδα, ασύγχρονες ανταλλαγές και προαιρετική αξιοπιστία. Σε επίπεδο διαστημικών υπηρεσιών, το πρωτόκολλο πακέτων διαστήματος του CCSDS τυποποιεί τη μεταφορά δεδομένων αποστολής, ενώ το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων CFDP στοχεύει στη μεταφορά αρχείων προς και από τα αποθηκευτικά συστήματα του σκάφους. Οι λειτουργίες αυτές είναι διακριτές από τη δικτύωση ανθεκτική σε καθυστέρηση, η οποία αντιμετωπίζει κυρίως την καθυστέρηση και τη διακοπόμενη συνδεσιμότητα. Ο παρακάτω πίνακας αποσαφηνίζει τη λειτουργική τοποθέτηση κάθε πρωτοκόλλου, ώστε να αποφεύγεται η εσφαλμένη σύγκρισή τους ως ανταγωνιστικών.

Λειτουργία	Πρωτόκολλο / τεχνολογία	Κύριος ρόλος	Προτεινόμενη χρήση στο IoST-SPA
Διεπαφή αισθητήρα/συσκευής	PC / SPI / UART / αναλογικές διεπαφές	Σύνδεση αισθητήρα με ελεγκτή	Τοπική σύνδεση πολύ μικρής εμβέλειας· δεν είναι πρωτόκολλο Γης-διαστήματος
Τοπικό δίκτυο χαμηλής ισχύος	ZigBee / αντίστοιχο ασύρματο	Κατανεμημένοι μη κρίσιμοι αισθητήρες	Υποψήφιο για τοπική παρακολούθηση· απαιτεί επικύρωση ανά αποστολή
Μηνύματα εφαρμογής	MQTT 5.0 [S1]	Τηλεμετρία δημοσίευσης/συνδρομής και αποσύζευξη εφαρμογών	Κατάλληλο κυρίως τοπικά, με αξιόπιστο υπόστρωμα μεταφοράς
Εφαρμογή περιορισμένων κόμβων	CoAP [S2]	Επικοινωνία προσανατολισμένη σε πόρους	Χαμηλή επιβάρυνση, ασύγχρονες ανταλλαγές· υποψήφιο για περιορισμένους κόμβους
Υπηρεσία DTN	BPv7 / RFC 9171 [S3]	Αποθήκευση-και-προώθηση σε διαδρομές με καθυστέρηση	Καθυστερημένη τηλεμετρία, συμβάντα, δέσμες προς αναμεταδότες/Γη
Ασφάλεια DTN	BPSec / RFC 9172 [S4]	Ακεραιότητα και εμπιστευτικότητα δεσμών	Υπηρεσία ασφάλειας για δέσμες DTN
Υπηρεσία πακέτων αποστολής	CCSDS 133.0-B-2 [S5]	Τυποποίηση πακέτων διαστήματος	Οργάνωση δεδομένων αποστολής όπου υιοθετείται
Μεταφορά αρχείων	CCSDS CFDP 727.0-B-5 [S6]	Μεταφορά αρχείων προς/από το σκάφος	Εικόνες, αρχεία καταγραφής, πακέτα μοντέλων, επιστημονικά δεδομένα
Ασφάλεια ζεύξης διαστήματος	CCSDS 355.0-B-2 [S7]	Πιστοποίηση/εμπιστευτικότητα στο επίπεδο ζεύξης	Προστασία ζεύξεων δεδομένων CCSDS όπου εφαρμόζεται

Πίνακας 3-6 Αντιστοίχιση πρωτοκόλλων και λειτουργιών για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική IoST-SPA.

3.2.4 Hardware Πλατφόρμες: Από το Εργαστήριο στον Δορυφόρο

Το βιβλιογραφικό σώμα αξιοποιεί ευρύ φάσμα hardware πλατφορμών, από εμπορικά διαθέσιμους μικροελεγκτές έως εξειδικευμένες διαστημικές πλατφόρμες. Οι μικροελεγκτές Arduino UNO, Raspberry Pi 4 και ESP32 αποτελούν τις πλέον διαδεδομένες πλατφόρμες, αξιοποιούμενες για συλλογή δεδομένων αισθητήρων, ασύρματη μετάδοση και τοπικό έλεγχο. Ο ESP32 κρίνεται ιδιαίτερα κατάλληλος για ενσωμάτωση σε CubeSats λόγω ευελιξίας, χαμηλού κόστους και αποδοτικής ασύρματης μετάδοσης μέσω ESP-NOW σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους. Για εξειδικευμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται

επίσης ειδικές πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (custom PCBs) για ηλεκτρική απομόνωση αισθητήρων από θορύβους [90], [91], [93].

Οι ναυοδορυφόροι CubeSat αναδεικνύονται ως η κατεξοχήν πλατφόρμα διεξαγωγής πειραμάτων στο διάστημα: ο αρθρωτός σχεδιασμός ($10 \times 10 \times 10$ cm ανά μονάδα U), το χαμηλό κόστος και η προσβασιμότητα σε πανεπιστήμια και μικρότερους οργανισμούς τους καθιστούν ιδανικούς φορείς δοκιμής τεχνολογιών IoST. Όμως, το hardware στο διάστημα αντιμετωπίζει σκληρές συνθήκες όπως ακτινοβολία, ακραίες θερμοκρασίες, κενό, μηχανικές δονήσεις, διακυμάνσεις ισχύος, που επιβάλλουν ανθεκτικά υλικά και αποδοτικά συστήματα διαχείρισης ισχύος, απαιτήσεις που κανένα από τα παρουσιαζόμενα συστήματα δεν έχει πλήρως ικανοποιήσει [90], [93].

Για τη διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας το οποίο είναι κρίσιμο ζήτημα σε CubeSats με δραματικά περιορισμένη χωρητικότητα ισχύος, εφαρμόζονται τρεις κύριες στρατηγικές. Πρώτον, διαλείπουσα λειτουργία (duty cycling): οι συσκευές IoT μεταβαίνουν αμέσως σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης μετά τη μετάδοση δεδομένων, ενώ οι αντλίες ομίχλης λειτουργούν σε σύντομους παλμούς (π.χ. ψεκασμός 2 δευτερολέπτων κάθε 15 λεπτά) και ο φωτισμός LED ακολουθεί αυστηρό φωτοπερίοδο (16 ώρες ενεργός, 8 ώρες ανενεργός). Δεύτερον, μεταφορά υπολογιστικού φόρτου (task offloading): η βαριά επεξεργασία (π.χ. μοντέλα computer vision) μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στο cloud, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη ισχυρού hardware στον δορυφόρο. Τρίτον, συγκομιδή ενέργειας (energy harvesting): αλγόριθμοι Ενισχυτικής Μάθησης προσαρμόζουν τη συμπεριφορά offloading ανάλογα με τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα που συλλέγονται από το περιβάλλον [90], [92], [93], [95].

3.2.5 Συστήματα Αισθητήρων για Παρακολούθηση Καλλιέργειας

Τα συστήματα αισθητήρων του Άξονα A2 καλύπτουν ευρύ φάσμα φυσικών παραμέτρων, από βασικές μετρήσεις περιβάλλοντος έως εξελιγμένα οπτικά συστήματα. Ο πλέον διαδεδομένος συνδυασμός περιλαμβάνει αισθητήρες κλίματος (θερμοκρασία, υγρασία) με αισθητήρες ποιότητας θρεπτικού διαλύματος (pH, Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, Θερμοκρασία Νερού, Διαλυμένο Οξυγόνο). Σε εξειδικευμένες εφαρμογές ενσωματώνονται αισθητήρες CO₂ και O₂, ηλεκτρονικές μύτες (e-noses), αισθητήρες φωτεινής έντασης (PPFD) και επιταχυνσιόμετρα για μέτρηση βαρύτητας [90], [91], [95], [96].

Για την παρακολούθηση υγείας φυτών σε ανώτερο επίπεδο, τρία συστήματα χρησιμοποιούν προηγμένη οπτική τεχνολογία. Το σύστημα EDEN ISS αξιοποιεί κάμερες διπλού μήκους κύματος (Dual Wavelength Spectral Imaging) που λαμβάνουν ταυτόχρονα φως στο Εγγύς Υπέρυθρο (NIR: 690–790 nm) και στο Μπλε (380–550 nm), επιτρέποντας τον υπολογισμό του NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ο δείκτης NDVI αποδείχθηκε ικανός να εντοπίσει βλάβη στην παροχή θρεπτικών σε καλλιέργεια ντομάτας 3 έως 5 ημέρες πριν από την εμφάνιση ορατών συμπτωμάτων — εύρημα κρίσιμης σημασίας για αυτόνομα συστήματα πρώιμης ανίχνευσης [9].

Το υπερφασματικό σύστημα των Qin κ.ά. χρησιμοποιεί κάμερα line-scan (400–1000 nm) με φωτισμό UV-A για λήψη εικόνων ανακλαστικότητας και φθορισμού, εφαρμόζοντας επτά αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για ανίχνευση στρες ξηρασίας. Ο Discriminant Classifier επέτυχε ακρίβεια 94,3% την 4η ημέρα στρες και 98,5% την 7η ημέρα — αποτελέσματα που τεκμηριώνουν τη δυνατότητα αξιόπιστης μη καταστροφικής διάγνωσης. Ο δείκτης R690/R702 αναδείχθηκε ως εξαιρετικά ακριβής για ανίχνευση στρες ξηρασίας, ενώ ο R559/R678 για διαχωρισμό φυτού από έδαφος. Το σύστημα τηλεπισκόπησης των Battistuzzi κ.ά. αναπτύχθηκε για φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς σε μη-γίνεες συνθήκες, υπολογίζοντας ειδικό στενόζωνο NDVI (R745-755/R675-685) ως δείκτη βιομάζας και παραγωγής χλωροφύλλης [97], [98].

Παρά τα υψηλά ποσοστά ακρίβειας, η γενικευσιμότητα τέτοιων συστημάτων παραμένει περιορισμένη. Η μελέτη των Qin κ.ά. αφορά ένα φυτικό είδος και ένα κυρίαρχο είδος καταπόνησης, δηλαδή στρες ξηρασίας, σε αυστηρά ελεγχόμενο θάλαμο. Σε ένα πραγματικό πολυκαλλιεργητικό BLSS, τα φυτά θα υφίστανται ταυτόχρονα και αλληλεπιδρώσεις καταπονήσεις, όπως μικροβαρύτητα, ακτινοβολία, θρεπτική ανεπάρκεια, παθογόνα, οσμωτικό στρες και μεταβολές μικροκλίματος. Επομένως, η απουσία μεγάλων πολυπαραγοντικών συνόλων δεδομένων περιορίζει τη μεταφερσιμότητα αυτών των υψηλών ποσοστών ακρίβειας πέρα από το εργαστηριακό πλαίσιο [97].

Για μη καταστροφική ανάλυση σε πραγματικό χρόνο (real-time non-destructive sensing), οι Garegnani κ.ά. χρησιμοποιούν φορητό πολυπαραμετρικό αισθητήρα φθορισμού για ποσοτική εκτίμηση φλαβονολών, ανθοκυανινών και χλωροφύλλης σε μικροπράσινα ραπανιού — άμεσο δείκτη διατροφικής αξίας (nutraceutical properties) υπό διαφορετικές «συνταγές» LED. Η ολοκληρωμένη συσκευή αυτοματοποιημένης συγκομιδής Limnospira

των Taltec κ.ά. χρησιμοποιεί βιομηχανικούς αισθητήρες πίεσης, θερμοκρασίας και στάθμης για αυτόματο έλεγχο της διαδικασίας στερεάς-υγρής διαχωρισμού σε χωρίς παρέμβαση πληρώματος [99], [100].

3.2.6 Τεχνητή Νοημοσύνη, Ψηφιακοί Δίδυμοι και Ανίχνευση Ανωμαλιών

Το βιβλιογραφικό σώμα καλύπτει τρεις διακριτές εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης: πρόβλεψη βιομάζας και απόδοσης, έλεγχο περιβάλλοντος, και ανίχνευση ανωμαλιών. Στην πρώτη κατηγορία, οι Liang κ.ά. δημιουργούν ψηφιακό δίδυμο (digital twin) ανάπτυξης μαρουλιού ενσωματώνοντας δεδομένα IoT από έξι κλιματικές ζώνες της Γης σε πραγματικό χρόνο. Το μοντέλο Random Forest Regression επιτυγχάνει συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,984-0,986$ με MAPE $\sim 6\%$ — εντυπωσιακή ακρίβεια για πρόβλεψη βιομάζας υπό μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες. Οι Ryu κ.ά. εφαρμόζουν Δυναμική Συστημάτων (System Dynamics) για τον χαρακτηρισμό παραγωγής ντομάτας σε αυτόνομες πλατφόρμες εσωτερικής γεωργίας, ενσωματώνοντας παραμέτρους EC, pH, θερμοκρασία νερού και αναλογίες N-P-K.[101], [102]

Η αριθμητική ακρίβεια των ψηφιακών διδύμων είναι εντυπωσιακή, αλλά η γενικευσιμότητα σε διαστημικές συνθήκες παραμένει αβέβαιη. Το μοντέλο των Liang κ.ά. εκπαιδεύτηκε σε ιστορικά επίγεια δεδομένα και χρειάστηκε διορθωτικούς συντελεστές όταν άλλαξαν οι συνθήκες καλλιέργειας, όπως η διακοπή ποτίσματος ή η αλλαγή υποστρώματος. Άρα η υψηλή επίδοση δείχνει ισχυρή τοπική προσαρμογή. Δεν αποδεικνύει ακόμη αυτόνομη συμπεριφορά σε άγνωστα διαστημικά στρες [92].

Στην κατηγορία ελέγχου περιβάλλοντος, το σύστημα fogponics των Suganob κ.ά. υλοποιεί ολοκληρωμένη end-to-end αρχιτεκτονική: αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας ομίχλης (DHT22, DS18B20) τροφοδοτούν απευθείας το Προσαρμοστικό Νευρο-Ασαφές Σύστημα Συμπερασμού (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS), το οποίο υπολογίζει δυναμικά τις βέλτιστες παραμέτρους και δίνει εντολές στους ενεργοποιητές, θερμοηλεκτρικό ψύκτη TEC και δίσκο παραγωγής ομίχλης. Το μοντέλο επιτυγχάνει RMSE 0,00932 για πρόβλεψη τάσης ελέγχου ψύξης, αποτέλεσμα που τεκμηριώνει την ικανότητα νευρο-ασαφούς ελέγχου για αυτόνομη ρύθμιση μικροκλίματος. Το ίδιο σύστημα αποτελεί το μοναδικό end-to-end παράδειγμα στον Άξονα A2 όπου αισθητήρας, αυτόνομη απόφαση και ενεργοποιητής λειτουργούν σε κλειστό κύκλο χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, υπό προσομοίωση μερικής βαρύτητας Άρη στο εργαστήριο [95].

Για ανίχνευση ανωμαλιών στη λειτουργία BLSS, οι Rewicki κ.ά. αναλύουν 97 μεταβλητές τηλεμετρίας από τα υποσυστήματα ατμόσφαιρας, θρεπτικών, φωτισμού και θερμότητας του EDEN ISS, εφαρμόζοντας αλγορίθμους χωρίς επίβλεψη (unsupervised) — MDI (Maximally Divergent Intervals) και DAMP (Discord Aware Matrix Profile). Τα δεδομένα χρονοσειρών επεξεργάζονται με τεχνικές εξαγωγής χαρακτηριστικών ROCKET και Catch22, ομαδοποιούμενα μέσω K-Means και Ιεραρχικής Ομαδοποίησης (HAC) για διαχωρισμό τύπων ανωμαλίας. Σημαντικά, το σύστημα εντόπισε επαναλαμβανόμενες ανωμαλίες όπως απρόσμενες αιχμές CO₂ και πτώσεις θερμοκρασίας σε πραγματικές συνθήκες αποστολής. Ο κώδικας είναι δημόσια διαθέσιμος στο GitLab, καθιστώντας το σύστημα άμεσα επαληθεύσιμο και επεκτάσιμο [89].

Η μεθοδολογία είναι χρήσιμη, αλλά η απουσία αληθών ετικετών και βιολογικής διάγνωσης περιορίζει την επιχειρησιακή της αξία. Ένας μη επιβλεπόμενος αλγόριθμος μπορεί να εντοπίσει αριθμητική απόκλιση. Δεν μπορεί από μόνος του να αποφασίσει αν η απόκλιση οφείλεται σε βλάβη αισθητήρα, φυσιολογική απόκριση φυτού, βιολογικό στρες ή ψευδώς θετικό σήμα. Για αυτό, η ανίχνευση ανωμαλιών χρειάζεται σύνδεση με βιολογικούς κανόνες και εξηγήσιμα μοντέλα [89].

Το ευρύτερο οικοσύστημα AI/ML που αναφέρεται στο βιβλιογραφικό σώμα περιλαμβάνει ακόμη Random Forest, Boosted Decision Trees, CNN, RNN, LSTM και GAN για πρόβλεψη βιομάζας, μοντέλα YOLOv8 και EfficientNetB4 για ταξινόμηση εικόνας, και αλγόριθμους Ενισχυτικής Μάθησης, Αντιθετικής Μάθησης (Contrastive Learning) και Μοντέλα Διάχυσης (Diffusion Models) σε συνδυασμό με Επεξηγήσιμη Τεχνητή Νοημοσύνη (XAI) για ανάλυση δεδομένων χρονοσειρών. Η ποικιλία αυτή αντικατοπτρίζει τη ραγδαία ωρίμανση του τομέα, αλλά επίσης αναδεικνύει την απουσία ενοποιημένης στρατηγικής AI για BLSS γιατί κάθε μελέτη επιλέγει αλγόριθμο ανεξάρτητα και χωρίς συγκριτική αξιολόγηση [101], [93], [94].

Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τις αυτόνομες τεχνολογίες, τις AI/IoST λύσεις και τα κύρια κενά που τεκμηριώνονται στον Άξονα A2.

Τίτλος άρθρου	Τεχνολογία	Εκτίμηση TRL	Δοκιμή σε αναλογικό περιβάλλον ή ISS	Κύριο κενό που αναφέρει η δημοσίευση
Digital twin for lettuce growth in six climate zones ('Climate 2050')	Ψηφιακά δίδυμα, μηχανική μάθηση, IoT	Εργαστηριακό (Θάλαμος ανάπτυξης)	Όχι	Ανάγκη για συλλογή περισσότερων ιστορικών δεδομένων και ενσωμάτωση ακόμη περιβαλλοντικών μεταβλητών (όπως η ποσότητα νερού) για τη βελτίωση της γενίκευσης του μοντέλου
A low-cost autonomous and scalable hydroponics system for space farming	Αυτόνομη υδροπονία, αισθητήρες IoT, υπολογιστικό νέφος (ThingSpeak)	Εργαστηριακό / Πρωτότυπο	Όχι	Έλλειψη δοκιμών σε συνθήκες μικροβαρύτητας για την αξιολόγηση της απόδοσης, καθώς και ανάγκη ενσωμάτωσης οπτικών αισθητήρων για πλήρη αυτονομία
Unraveling Anomalies in Time: Unsupervised Discovery and Isolation of Anomalous Behavior in Bio-Regenerative Life Support System Telemetry	MDI, DAMP, Ομαδοποίηση Χρονοσειρών (Time Series Clustering)	Υψηλό (Ανάλυση πραγματικής τηλεμετρίας)	Ναι (Αναλογικό - EDEN ISS)	Η απομόνωση ανωμαλιών απαιτεί πιο εις βάθος ανάλυση των βαθύτερων αιτιών (root causes) που τις προκαλούν, ενώ προτείνεται η περαιτέρω εξερεύνηση των χαρακτηριστικών Catch22
A Novel Cloud computing Architecture for Internet of Space Things (IoST)	Υπολογιστικό νέφος, IoST, Δορυφορικά Δίκτυα, TCP/IP	Εννοιολογικό (Πρόταση Αρχιτεκτονικής)	Όχι	Απαιτούνται περαιτέρω έρευνες για τις διαδικασίες αυθεντικοποίησης, την ασφάλεια της επικοινωνίας και τη χρήση μηχανικής μάθησης για το φιλτράρισμα θορύβου
Adaptive Neuro-Fuzzy-Based Environment Sensing and Control of a Fogponics System Under Simulated Partial Gravity	ANFIS, Ασαφής Λογική, Fogponics, TEC ψύκτες	Εργαστηριακό	Όχι (Μόνο προσομοίωση)	Η μελέτη περιορίστηκε στη μοντελοποίηση του συστήματος ελέγχου, οπότε η αποτελεσματικότητα σε πραγματικές συνθήκες μερικής βαρύτητας απαιτεί ξεχωριστή αξιολόγηση
Interplay of Fogponics and Artificial Intelligence for Potential Application in Controlled Space Farming	Ομιχλοπονία, τεχνητή νοημοσύνη, IoT, ψηφιακά δίδυμα (ανασκόπηση)	N/A (Ανασκόπηση)	Όχι	Απουσιάζει ο ακριβής χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς της ομίχλης σε μικροβαρύτητα, και υπάρχει ανάγκη για προσαρμοστικά συστήματα εφοδιασμένα με ηλεκτρονικές μύτες (e-nose)

A Cloud Computing Framework for Space Farming Data Analysis	ESP-NOW, AWS IoT Core, υπολογιστική όραση (Roboflow)	Εργαστηριακό (CubeSat payload)	Όχι	Απαιτούνται δοκιμές πεδίου σε προσομοιωμένη μικροβαρύτητα στη Γη για να μετριάσουν ανωμαλίες (π.χ. ακτινοβολία, δονήσεις) και ανάγκη αυτόνομων συστημάτων λήψης αποφάσεων
Cloud Computing - Enabled Multi-Axis Soilless Clinostat for Earth-Based Simulation of Partial Gravity and Light Interaction in Seedling Tropisms	Τριαξονικός κλινοστάτης, αεροπονία, IoT, αυτοματισμοί	Εργαστηριακό	Όχι (Επίγεια προσομοίωση βαρύτητας)	Απουσιάζουν κρίσιμοι διαστημικοί παράγοντες καταπόνησης (όπως η κοσμική ακτινοβολία και η χαμηλή πίεση), και χρειάζεται βελτιστοποίηση του συνδυαστικού ελέγχου φωτός-βαρύτητας
Microgreens for Home, Commercial, and Space Farming: A Comprehensive Update of the Most Recent Developments	Υδροπονία, Αεροπονία, Υποστρώματα χωρίς χώμα (Ανασκόπηση)	N/A (Ανασκόπηση)	Ναι (Γίνονται αναφορές σε δοκιμές ISS)	Κενά εντοπίζονται στην αδυναμία παραγωγής απογόνων (υψηλή κατανάλωση σπόρων) και στη χαμηλή δέσμευση βιομάζας και παραγωγή οξυγόνου σε σύγκριση με μεγαλύτερα φυτά
The Plant Health Monitoring System of the EDEN ISS Space Greenhouse in Antarctica During the 2018 Experiment Phase	Τηλεμετρία, Φασματική Απεικόνιση (NDVI), HD Κάμερες	Υψηλό (Ανταρκτική)	Ναι (Αναλογικό - EDEN ISS)	Η συχνότητα λήψης μίας εικόνας την ημέρα είναι πολύ χαμηλή για έγκαιρη απόκριση, και υπάρχει ανάγκη για επανεκτίμηση δεικτών απόδοσης και εφαρμογή του συστήματος στην ανίχνευση ασθενειών
A New Remote Sensing-Based System for the Monitoring and Analysis of Growth and Gas Exchange Rates of Photosynthetic Microorganisms Under Simulated Non-Terrestrial Conditions	Star Light Simulator, Τηλεπισκόπηση, Φασματόμετρα	Εργαστηριακό	Όχι	Απαιτείται η δημιουργία βάσεων δεδομένων επιφανειακών και ατμοσφαιρικών βιοϋπογραφών (biosignatures), ώστε να αξιοποιηθούν σε μελλοντικές διαστημικές αποστολές
A hyperspectral plant health monitoring system for space crop production	Υπερφασματική Απεικόνιση (Ανακλαστικότητα/ Φθορισμός), Μηχανική Μάθηση	Εργαστηριακό (Σε θάλαμο ελέγχου NASA)	Όχι	Υπάρχει άμεση ανάγκη για πειράματα πλήρους κλίμακας σε πολλαπλά είδη φυτών και για ανάπτυξη πιο προηγμένων αλγορίθμων σύντηξης

				φάσματος/εικόνας για την πρόωμη ανίχνευση του στρες
Non-destructive real-time analysis of plant metabolite accumulation in radish microgreens under different LED light recipes	Φωτισμός LED, Αισθητήρες Φθορισμού (Multiplex)	Εργαστηριακό	Όχι	Είναι απαραίτητος ο μελλοντικός σχεδιασμός Βιοαναγεννητικών Συστημάτων (BLSS) πλήρως ενσωματωμένων με μη καταστροφικές τεχνολογίες για την ανίχνευση του στρες σε πραγματικό χρόνο στο διάστημα
Implementation of an automated process for <i>Limnospira indica</i> harvesting and culture medium recycling for space applications	Διήθηση (Dead-end filtration), Υπερδιήθηση (Ultrafiltration)	Εργαστηριακό (Breadboard)	Όχι	Χρειάζονται συμπληρωματικές μέθοδοι για την αποφυγή συσσώρευσης μάζας (cake accumulation) στο φίλτρο, ενώ η πραγματική απόδοση της υπερδιήθησης δεν αξιολογήθηκε πλήρως αυτόνομα
An Application of System Dynamics to Characterize Crop Production for Autonomous Indoor Farming Platforms (AIFP)	Δυναμική συστημάτων (SD), υδροπονία, IoT	Εργαστηριακό	Όχι	Προτείνεται η ενσωμάτωση πλατφορμών Ψηφιακών Διδύμων (Ψηφιακά Δίδυμα) και επιχειρησιακών υπηρεσιών web (όπως το AWS) για την καλύτερη προσομοίωση και οπτικοποίηση σε μεγαλύτερα έργα

Πίνακας 3-7 Αυτόνομες τεχνολογίες διαστημικής γεωργίας και κύρια κενά.

3.2.7 Επίγειες Αναλογικές Αποστολές και Επίπεδα Τεχνολογικής Ωριμότητας

Η αξιολόγηση των επιπέδων τεχνολογικής ωριμότητας (TRL) αποκαλύπτει ότι κανένα από τα νέα συστήματα που παρουσιάζονται δεν έχει δοκιμαστεί απευθείας στον ISS. Μόνο δύο κατηγορίες συστημάτων ξεπερνούν το εργαστηριακό επίπεδο: εκείνα που δοκιμάστηκαν στο αναλογικό EDEN ISS στην Ανταρκτική και εκείνα που αξιολογήθηκαν σε επίγειους προσομοιωτές βαρύτητας[89], [90], [9].

Το διαστημικό θερμοκήπιο EDEN ISS στον γερμανικό σταθμό Neumayer III στην Ανταρκτική αποτελεί το μοναδικό αναλογικό περιβάλλον του βιβλιογραφικού σώματος. Κατά την πειραματική φάση 2018, δοκιμάστηκε το σύστημα παρακολούθησης υγείας φυτών σε πραγματικές συνθήκες αποστολής, με δίκτυο απομακρυσμένων ειδικών (Utilization Home Bases, UHBs) και αυτόματη μετάδοση εικόνων μέσω δορυφορικής σύνδεσης FTP, επιτυγχάνοντας συγκομιδή ~270 kg φρέσκιας βιομάζας. Τα δεδομένα

τηλεμετρίας EDEN ISS χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω για αξιολόγηση αλγορίθμων ανίχνευσης ανωμαλιών, επιτρέποντας τον εντοπισμό συστημικών βλαβών σε πραγματικές συνθήκες [89], [9].

Στους επίγειους προσομοιωτές βαρύτητας, ο πολυαξονικός κλινοστάτης των Cacayurin κ.ά. δοκίμασε την καλλιέργεια χωρίς χώμα υπό μερική βαρύτητα Άρη (0,35–0,40g), ενώ το σύστημα ANFIS fogponics αξιολογήθηκε παρομοίως σε εργαστηριακό κλινοστάτη μερικής βαρύτητας. Εντούτοις, και τα δύο συστήματα επισημαίνουν ρητά ότι η κοσμική ακτινοβολία, η χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση και οι θερμικές ακρότητες των πραγματικών συνθηκών δεν ελήφθησαν υπόψη, με αποτέλεσμα τα υλικά κατασκευής (ακρυλικό, χάλυβας) να απαιτούν αντικατάσταση από ανθεκτικά στην ακτινοβολία (radiation-hardened) υλικά πριν από οποιαδήποτε πραγματική αποστολή. Αυτή η απουσία πειραματικής επικύρωσης σε πραγματικές συνθήκες πτήσης αποτελεί το κοινό και κεντρικό κενό ολόκληρου του Άξονα Α2 δηλαδή η αξιοπιστία και η συμπεριφορά των ολοκληρωμένων έξυπνων συστημάτων σε πραγματική μικροβαρύτητα παραμένει απαλήθευτη, καθώς η δυναμική των ρευστών (σταγονίδια ομίχλης που δεν καθιζάνουν) αλλοιώνει τις παραμέτρους εκπαίδευσης των μοντέλων [90], [95].

Έχει ιδιαίτερο βάρος η ρευστοδυναμική πρόκληση σε μηδενική ή μερική βαρύτητα. Το νερό δεν καθιζάνει όπως στη Γη αλλά σχηματίζει σφαιρικά σταγονίδια λόγω επιφανειακής τάσης και μπορεί να προκαλέσει ανομοιόμορφη παροχή θρεπτικών. Τα συστήματα fogponics και aeroponics είναι ελκυστικά, επειδή μειώνουν τη χρήση νερού. Η μεταφορά τους στο διάστημα, όμως, παραμένει ανοιχτή χωρίς συστηματικές δοκιμές σε πραγματική μικροβαρύτητα ή μερική βαρύτητα [90], [95], [103].

3.2.8 Τεχνολογικά Κενά και Σύνθεση

Η συγκεντρωτική ανάλυση των ενοτήτων «μελλοντικές κατευθύνσεις» των άρθρων αναδεικνύει τέσσερα κεντρικά τεχνολογικά κενά, κατά φθίνουσα συχνότητα αναφοράς:

1. Έλλειψη δοκιμών σε πραγματικές διαστημικές συνθήκες. Η συχνότερη επισήμανση αφορά την ανάγκη δοκιμής πέρα από επίγειους προσομοιωτές, για αξιολόγηση επιπτώσεων πραγματικής μικροβαρύτητας, κοσμικής ακτινοβολίας, ακραίων θερμοκρασιών και μηχανικών δονήσεων [90], [91], [93].

2. Ανεπαρκής εμπλουτισμός δεδομένων και αισθητήρων. Τα τρέχοντα μοντέλα απουσιάζουν κρίσιμες μεταβλητές (CO₂, ταχύτητα αέρα, θρεπτικά εδάφους) και χρειάζονται μεγαλύτερα datasets για γενίκευση σε διαφορετικά σενάρια χωρίς ιστορικά δεδομένα [101], [103].

3. Hardware βελτιώσεις για διαστημικές συνθήκες. Απαιτούνται ανθεκτικά στην ακτινοβολία υλικά αντί ακρυλικού-χάλυβα, συμπαγείς ενεργειακά αποδοτικές συσκευές παραγωγής ομίχλης και μηχανισμοί αποφυγής συσσώρευσης βιομάζας στα φίλτρα [90], [95], [100].

4. Ενοποίηση AI και Digital Twins σε ολοκληρωμένο σύστημα. Απουσιάζουν ενιαία μοντέλα που γενικεύουν σε διαφορετικά σενάρια, αλγόριθμοι σύντηξης εικόνας-αισθητήρα και ολοκληρωμένα συστήματα αυτόνομης λήψης αποφάσεων που καλύπτουν ολόκληρο τον κύκλο παρακολούθησης-απόφασης-δράσης [89], [101], [103].

Κεντρικό συμπέρασμα του Άξονα A2 είναι ότι το πραγματικό κενό δεν είναι η απουσία end-to-end αρχιτεκτονικών ελέγχου — τέτοιες υπάρχουν και λειτουργούν αποτελεσματικά στη Γη — αλλά η αξιοπιστία και η συμπεριφορά αυτών των ολοκληρωμένων έξυπνων συστημάτων σε συνθήκες πραγματικής έλλειψης βαρύτητας, όπου η αλλαγή δυναμικής ρευστών αλλοιώνει τις παραμέτρους πάνω στις οποίες έχουν εκπαιδευτεί τα μοντέλα λήψης αποφάσεων. Η διαπίστωση αυτή συνδέεται άμεσα με το ερευνητικό κενό που αντιμετωπίζει η παρούσα διατριβή: ο σχεδιασμός αρχιτεκτονικής IoST που να ενσωματώνει αυτόνομο έλεγχο με μηχανισμούς αντιμετώπισης της ρευστοδυναμικής αβεβαιότητας σε εξωγήινα περιβάλλοντα.

3.3 Άξονας A3: Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος και Τεχνολογία — Η Γέφυρα προς το Διάστημα

Ο τρίτος θεματικός άξονας συγκεντρώνει 7 δημοσιεύσεις γήινης τεχνολογίας γεωργίας ελεγχόμενου περιβάλλοντος (Controlled Environment Agriculture, CEA) με ρητή ή υπονοούμενη αναφορά σε μεταφορά στο διάστημα. Πρόκειται για τον άξονα που αναλαμβάνει να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ ώριμης επίγειας τεχνολογίας και διαστημικής εφαρμοσιμότητας — αναδεικνύοντας τόσο τις δυνατότητες όσο και τους θεμελιώδεις περιορισμούς αυτής της μεταφοράς.

Οι επτά δημοσιεύσεις καλύπτουν δύο κύριες τεχνολογικές κατευθύνσεις — αφενός συστήματα παρακολούθησης και αυτοματοποίησης φωτοβιοαντιδραστήρων (PBR) για καλλιέργεια μικροαλγών, και αφετέρου ένα ολοκληρωμένο IoT σύστημα αεροπονικής καλλιέργειας φυτών. Η θεματική κατανομή αντικατοπτρίζει μια συγκεκριμένη ερευνητική λογική: τα εργαλεία παρακολούθησης και ελέγχου PBR που αναπτύχθηκαν για επίγειες βιομηχανικές εφαρμογές αποτελούν την τεχνολογική βάση για τα βιοαναγεννητικά συστήματα ζωής του Άξονα Α1, και ο ρόλος του Άξονα Α3 είναι να αξιολογήσει πόσο άμεσα μεταφέρεται αυτή η βάση [104], [105], [106].

3.3.1 Χαρτογράφηση του Βιβλιογραφικού Σώματος: Τεχνολογίες, Εφαρμογές και Επίπεδα Ωριμότητας

Η χαρτογράφηση των επτά δημοσιεύσεων αποκαλύπτει ένα βιβλιογραφικό σώμα ομοιογενές ως προς το αντικείμενο, μικροαλγές και PBR κυριαρχούν, αλλά ανομοιογενές ως προς τον τύπο τεχνολογικής συνεισφοράς. Πέντε εργασίες αφορούν PBR μικροαλγών, ενώ μία εστιάζει στην αεροπονική καλλιέργεια φυτών. Οι τύποι τεχνολογικής εφαρμογής κατανέμονται ως εξής: μοντελοποίηση (Al Ketife, Posten), παρακολούθηση (Haberkorn, Mapstone, Dudina), αυτοματισμός και έλεγχος (Roffi, Dudina), και αναλυτικό λογισμικό (Mapstone).

Ως προς το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας (TRL), κανένα σύστημα δεν έχει δοκιμαστεί απευθείας στον ISS ή σε πραγματικές διαστημικές συνθήκες. Το λογισμικό ADA, δοκιμασμένο με εμπορικούς αντιδραστήρες (Algenuity, Industrial Plankton, Photon Systems Instruments), αξιολογείται σε TRL 4–5. Το πλήρες IoT σύστημα αεροπονίας εκτιμάται σε TRL 4. Η online κυτταρομετρία ροής (FCM) τοποθετείται επίσης σε TRL 4, ενώ τα πρωτότυπα PBR και το μαθηματικό μοντέλο βρίσκονται σε TRL 3–4. Η ανασκόπηση αρχών σχεδιασμού PBR του Posten δεν παρουσιάζει νέο φυσικό σύστημα και δεν αξιολογείται σε TRL [104], [105], [105], [106], [107], [108], [109].

3.3.2 Παρακολούθηση Φωτοβιοαντιδραστήρων: Από τον Αισθητήρα στη Βιολογική Απόφαση

Τα συστήματα παρακολούθησης PBR του βιβλιογραφικού σώματος καλύπτουν ένα φάσμα από απλές μετρήσεις περιβαλλοντικών παραμέτρων έως εξελιγμένη παρακολούθηση σε επίπεδο κυττάρου. Το μαθηματικό μοντέλο των Al Ketife κ.α. παρακολουθεί pH (διατηρείται σε 6–8), θερμοκρασία (20°C), φωτεινή ένταση και CO₂ μέσω ψηφιακών ελεγκτών ροής μάζας (MC-100SCM), μετρητή CO₂ (G110) και

φωτόμετρου (LI-250A). Το λογισμικό ADA επεξεργάζεται μετρήσεις οπτικής πυκνότητας (OD), θερμοκρασίας, pH, διαλυμένου οξυγόνου και φωτεινής έντασης από τους ενσωματωμένους αισθητήρες εμπορικών PBR, εφαρμόζοντας φίλτρα μείωσης θορύβου Savitzky-Golay και αλγορίθμους αυτόματης αφαίρεσης ακραίων τιμών (outlier removal) για την αποτροπή παραμόρφωσης αποτελεσμάτων από στιγμιαία σφάλματα εξοπλισμού [106], [107].

Η ανασκόπηση Posten εισάγει τεχνολογία αισθητήρων PAM (Pulse Amplitude Modulation) για on-line μέτρηση φθορισμού χλωροφύλλης και φωτοσυνθετικής απόδοσης, εκτός από τον έλεγχο θερμοκρασίας, pH, pO_2 και pCO_2 μέσω in-line αισθητήρων. Τα πρωτότυπα PBR της Dudina παρακολουθούν θερμοκρασία, pH και σύσταση αερίων εισόδου-εξόδου μέσω ενσωματωμένων αισθητήρων οπτικής πυκνότητας, ενώ αντιμετώπισαν επαναληπτικά μηχανικά προβλήματα — νεκρές ζώνες ανάμειξης και επικάλυψη LED από φύκη (biofouling) — μέσω ριζικού ανασχεδιασμού του βελτιωμένου πρωτοτύπου «402.1» [104], [108].

Η πλέον εξελιγμένη τεχνολογία παρακολούθησης του βιβλιογραφικού σώματος προέρχεται από την Haberkorn κ.ά., οι οποίοι εισάγουν αυτοματοποιημένη online κυτταρομετρία ροής (Flow Cytometry, FCM) ως εργαλείο παρακολούθησης πραγματικού χρόνου σε επίπεδο κυττάρου. Το σύστημα αξιοποιεί τον αναλυτή BD Accuri C6 Plus (λείζερ στα 488 nm) σε συνδυασμό με το αυτοματοποιημένο ρομπότ δειγματοληψίας OC-300, μετρώντας σε πραγματικό χρόνο — συγκέντρωση κυττάρων, ένταση πράσινου φθορισμού (FL1) για νουκλεϊκά οξέα, ένταση κόκκινου φθορισμού (FL3) για αυτοφθορισμό χλωροφύλλης, μέγεθος κυττάρων (FSC) και κοκκώδη υφή (SSC). Μέσω φαινοτυπικής αποτύπωσης (phenotypic fingerprinting) με αλγορίθμους στο στατιστικό περιβάλλον R (πακέτα flowCore και Phenoflow), το σύστημα διαχωρίζει και ποσοτικοποιεί ταυτόχρονα μικροφύκη και προκαρυωτικούς οργανισμούς, επιτρέποντας έγκαιρη ανίχνευση μολύνσεων πριν από βιολογική κατάρρευση της καλλιέργειας [105].

3.3.3 Αυτοματισμός και Επίπεδα Αυτονομίας

Η ανάλυση των επιπέδων αυτονομίας αποκαλύπτει σημαντική ανισομέρεια μεταξύ των συστημάτων. Το μοναδικό πλήρως ολοκληρωμένο end-to-end IoT σύστημα — αισθητήρας → επεξεργασία → ενεργοποιητής → τηλεχειρισμός — είναι το αεροπονικό σύστημα των Roffi κ.ά.: αισθητήρες DHT11 (θερμοκρασία-υγρασία) και BH1750 (φωτεινή ένταση)

τροφοδοτούν τον μικροελεγκτή Wemos D1 mini, ο οποίος ελέγχει αυτόνομα υπερηχητικούς νεφελοποιητές, ανεμιστήρες, στοιχεία ψύξης Peltier, αντλίες και συστοιχίες LED, μεταδίδοντας δεδομένα στην πλατφόρμα ThingSpeak για απομακρυσμένο τηλεχειρισμό. Η λογική ελέγχου βασίζεται σε κανόνες «αν-τότε-αλλιώς» (if-then-else) — π.χ. αυτόματη ενεργοποίηση ψύξης και αντλίας αν η θερμοκρασία υπερβεί τους 29°C και απενεργοποίησή τους κάτω από 25°C — χωρίς καθημερινή ανθρώπινη παρέμβαση [109].

Τα υπόλοιπα συστήματα παρουσιάζουν μερική αυτονομία. Το σύστημα FCM είναι πλήρως αυτοματοποιημένο ως προς τη δειγματοληψία, χρώση και ανάλυση, λειτουργώντας ωστόσο αποκλειστικά ως διαγνωστικό εργαλείο παρακολούθησης χωρίς να ελέγχει ενεργοποιητές. Τα πρωτότυπα PBR της Dudina ενσωματώνουν τοπικούς αυτόματους ελεγκτές θερμοκρασίας και οξύτητας (local automation) χωρίς τηλεμετρία ή απομακρυσμένο έλεγχο μέσω διαδικτύου. Το λογισμικό ADA αυτοματοποιεί την επεξεργασία δεδομένων αλλά απαιτεί χειροκίνητη εισαγωγή αρχείων CSV από τον χρήστη, παραδοχή μέτριας κρισιμότητας για διαστημικές εφαρμογές, καθώς η αρθρωτή αρχιτεκτονική ανοικτού κώδικα επιτρέπει μελλοντική αυτοματοποίηση της ροής δεδομένων [105], [106], [108].

Ως προς τη διαχείριση αστοχιών (fault tolerance), κανένα σύστημα δεν αναφέρει ρητούς μηχανισμούς υλικής εφεδρείας (hardware redundancy) π.χ. διπλούς αισθητήρες ή εφεδρικές αντλίες. Το IoT σύστημα αεροπονίας δεν διαθέτει μηχανισμό αυτόματης ανάκαμψης σε περίπτωση αστοχίας μικροελεγκτή ή διακοπής σύνδεσης. Έμμεσα, η ανασκόπηση Posten υπογραμμίζει ότι σε διαστημικές εφαρμογές η απόλυτη αξιοπιστία υπερτερεί του κόστους, προκρίνοντας παθητικούς σχεδιασμούς χωρίς μηχανικά μέρη — όπως ανταλλαγή αερίων μέσω μεμβρανών — για ελαχιστοποίηση κινδύνου συστημικής αστοχίας. Στο λογισμικό ADA, η διαχείριση σφαλμάτων αισθητήρων πραγματοποιείται αλγοριθμικά μέσω φίλτρων Savitzky-Golay και αφαίρεσης ακραίων τιμών [104], [106], [109].

Τα μαθηματικά μοντέλα PBR προσφέρουν ισχυρό εργαλείο σχεδιασμού, αλλά δεν μεταφέρονται αυτόματα στο διάστημα. Το μοντέλο των Al Ketife κ.ά. έδειξε υψηλή συμφωνία με επίγεια δεδομένα για βιομάζα και θρεπτικά. Η ρευστοδυναμική του βάσης, όμως, προϋποθέτει γήινη άνωση και φυσικό διαχωρισμό φυσαλίδων. Σε μικροβαρύτητα αυτά τα φαινόμενα αλλάζουν ριζικά — και μαζί τους αλλάζει ο πυρήνας του μοντέλου.

Το μαθηματικό μοντέλο του Al Ketife αντιμετωπίζει ένα θεμελιώδες κενό — την απουσία ολοκληρωμένης μαθηματικής περιγραφής που να συνδυάζει ταυτόχρονα ανάπτυξη βιομάζας μικροαλγών και αφαίρεση θρεπτικών (άζωτο, φώσφορος) σε κλειστούς αντιδραστήρες. Ως λύση, αναπτύσσεται ολοκληρωμένο μοντέλο διαφορικών εξισώσεων για *Chlorella vulgaris* σε MATLAB, ενσωματώνοντας μεταφορά μάζας αερίου-υγρού, εξασθένηση φωτός και βιοκινητική ανάπτυξης, βελτιστοποιημένο με αλγόριθμο simplex search [107].

Όμως, το μοντέλο βασίζεται σε αντιδραστήρες στήλης φυσαλίδων (bubble columns), υποθέτοντας ρητά την ύπαρξη βαρύτητας η οποία επιτρέπει στις φυσαλίδες να ανέρχονται και να εξασφαλίζουν μεταφορά μάζας CO₂ και ανάμειξη, καθώς και σταθερή πίεση 1 atm για τον υπολογισμό της σταθεράς Henry. Σε συνθήκες μικροβαρύτητας, ο διαχωρισμός αερίου-υγρού μέσω άνωσης καταρρέει πλήρως, καταστρέφοντας τον κεντρικό μηχανισμό λειτουργίας που περιγράφει το μοντέλο. Αυτή η παραδοχή έχει εξαιρετικά υψηλή κρισιμότητα για διαστημική εφαρμογή, καθιστώντας αναγκαία είτε την αντικατάσταση του μηχανισμού ανάμειξης είτε την πλήρη επαναδιατύπωση των εξισώσεων υπό ρευστοδυναμικές συνθήκες μικροβαρύτητας. Ακόμη, το επίπεδο άμεσης επαναχρησιμοποίησης χωρίς τροποποιήσεις είναι περιορισμένο — απαιτείται εκ νέου υπολογισμός παραμέτρων για διαφορετικές γεωμετρίες αντιδραστήρων, είδη μικροαλγών ή κλίμακα παραγωγής [104], [107].

Η κριτική αυτή είναι σημαντική επειδή το μοντέλο του Al Ketife παρουσιάζει υψηλή στατιστική προσαρμογή σε επίγεια δεδομένα, αλλά η μεταφερσιμότητα του δεν τεκμηριώνεται αυτόματα. Η υψηλή συσχέτιση με μετρήσεις βιομάζας και απομάκρυνσης θρεπτικών στη Γη βασίζεται σε φυσικούς μηχανισμούς που προϋποθέτουν άνωση, σχηματισμό φυσαλίδων και σταθερή βαρύτητα. Επομένως, η επιτυχία του ως επίγειο μοντέλο PBR πρέπει να διαχωρίζεται από την καταλληλότητά του ως μοντέλο μικροβαρύτητας [107].

Η ανασκόπηση αρχών σχεδιασμού PBR του Posten προσφέρει τεχνολογική κατεύθυνση για αντιμετώπιση της αδυναμίας αυτής. Κεντρική πρόταση αποτελεί η χρήση μεμβρανών διάχυσης αερίων (membrane gas diffusion) χωρίς δημιουργία φυσαλίδων, η οποία επιλύει ταυτόχρονα το πρόβλημα ανταλλαγής αερίων σε κλειστή ατμόσφαιρα και σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας. Ακόμη, προτείνεται αναλογία επιφάνειας-όγκου υψηλότερη

από τους συμβατικούς αντιδραστήρες, βελτιστοποιημένοι κύκλοι φωτός-σκότους μέσω ελεγχόμενης ανάμειξης και στόχος κόστους κάτω από 40 €/m² για γήινες εφαρμογές, απαίτηση που στο διάστημα αντικαθίσταται από υπεροχή αξιοπιστίας [104].

3.3.4 Αναλυτικό Λογισμικό: ADA ως Εργαλείο Γεφύρωσης

Το λογισμικό ADA (Algal Data Analyser) των Mapstone κ.ά. αντιπροσωπεύει μια ιδιαίτερα σημαντική συνεισφορά του Άξονα Α3, καθώς αντιμετωπίζει ένα πραγματικό λειτουργικό κενό — τη δυσκολία διαχείρισης του τεράστιου όγκου δεδομένων (εκατοντάδες χιλιάδες καταγραφές) που παράγουν σύγχρονοι αυτοματοποιημένοι PBR. Η πλατφόρμα είναι γραμμένη σε Python (NumPy, SciPy, Matplotlib) και προσφέρει: αυτοματοποιημένη εισαγωγή δεδομένων από διαφορετικά μηχανήματα, μείωση θορύβου μετρήσεων, προσαρμογή κινητικών μοντέλων ανάπτυξης (γραμμικά, εκθετικά, Zwietering) και εξαγωγή επιστημονικών γραφημάτων [106].

Το ADA υποστηρίζει εγγενώς δεδομένα από Algenuity (Algem Pro, HT24), Industrial Plankton και Photon Systems Instruments, και έχει επαληθευτεί σε μικροαλγές και κυανοβακτήρια που σχετίζονται άμεσα με το MELiSSA — *Chlorella sorokiniana*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Synechocystis* sp. και *Arthrospira platensis*. Η αρθρωτή αρχιτεκτονική ανοικτού κώδικα επιτρέπει εύκολη ενσωμάτωση νέων μορφών δεδομένων μέσω CSV, και το μελλοντικό roadmap περιλαμβάνει ρητά επέκταση για εξειδικευμένους PBR αναγεννητικής υποστήριξης ζωής [106].

Όμως, η τρέχουσα υλοποίηση απαιτεί χειροκίνητη φόρτωση αρχείων CSV, επιλογή ευθυγράμμισης αξόνων και εισαγωγή καμπυλών βαθμονόμησης για μετατροπή οπτικής πυκνότητας σε πραγματική συγκέντρωση. Αυτή η παραδοχή ανθρώπινης παρέμβασης αξιολογείται ως μέτριας κρισιμότητας για διαστημικές εφαρμογές, καθώς η αυτόνομη λειτουργία μπορεί να υλοποιηθεί μέσω επανακωδικοποίησης σε μικροελεγκτή (on-edge processing), τεχνικά εφικτό αλλά εκτός πεδίου της τρέχουσας έκδοσης. Το ADA δεν είναι άμεσα συμβατό με τους PBR του MELiSSA (χωρίς ειδικό parser για το format τους), αλλά η modular αρχιτεκτονική επιτρέπει σχετικά εύκολη επέκταση

Η μεταφερσιμότητα των επίγειων CEA συστημάτων στο διάστημα δεν μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη. Τα επίγεια συστήματα έχουν σταθερή βαρύτητα, εύκολη πρόσβαση για συντήρηση, δυνατότητα αντικατάστασης εξαρτημάτων και απουσία κοσμικής

ακτινοβολίας. Στο διάστημα, κάθε μία από αυτές τις προϋποθέσεις αποδυναμώνεται. Η τεχνολογία παραμένει χρήσιμη ως πρότυπο, αλλά όχι ως άμεση επιχειρησιακή λύση.

Η κεντρική διαπίστωση του Άξονα Α3 είναι ότι τα επίγεια CEA συστήματα παρέχουν θεμελιώδη τεχνολογική βάση, αυτοματισμούς IoT, λογισμικά ανάλυσης και εργαλεία in situ παρακολούθησης, αλλά παραμένουν αυστηρά δέσμια των φυσικών συνθηκών της Γης. Η παραδοχή ύπαρξης βαρύτητας είναι απολύτως κρίσιμη σε κάθε σύστημα του βιβλιογραφικού σώματος [104], [105], [107].

Στο μαθηματικό μοντέλο PBR, η βαρύτητα επιτρέπει ανάμειξη και μεταφορά μάζας μέσω ανόδου φυσαλίδων κάτι που είναι εξαιρετικά κρίσιμο. Στην ανασκόπηση Posten, η βαρύτητα είναι απαραίτητη για συμβατικό αερισμό PBR, με ρητή πρόταση αντικατάστασης από μεμβράνες. Στο IoT αεροπονικό σύστημα, η βαρύτητα επιτρέπει στα σταγονίδια ομίχλης να εγκαθίστανται στις ρίζες και στο πλεονάζον νερό να επιστρέφει στη δεξαμενή, το σύστημα άρδευσης απαιτεί ριζικό επανασχεδιασμό. Στο σύστημα FCM, η βαρύτητα συγκρατεί υγρά σε ανοικτές φιάλες κατά τη δειγματοληψία, η πειραματική διάταξη είναι εντελώς ανεφάρμοστη σε μικροβαρύτητα χωρίς μετατροπή σε κλειστά μικρο-ρευστομηχανικά κυκλώματα. Η παραδοχή ελεύθερης ανθρώπινης πρόσβασης για συντήρηση αποτελεί επίσης κρίσιμο περιορισμό. Ετσι τα PBR που απαιτούν αποσυναρμολόγηση για αφαίρεση biofouling ή επισκευή νεκρών ζωνών είναι απαγορευτικά σε κλειστά διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής [104], [105], [107].

Συνολικά, καμία δημοσίευση του Άξονα Α3 δεν έχει δοκιμάσει την τεχνολογία του σε πραγματικές ή προσομοιωμένες συνθήκες κοσμικής ακτινοβολίας, μειωμένης βαρύτητας ή αυστηρά κλειστής διαστημικής ατμόσφαιρας. Παρόλο που όλα τα άρθρα κάνουν θεωρητικές αναφορές σε διαστημικές εφαρμογές ή προγράμματα όπως το MELiSSA, όλες οι πειραματικές διατάξεις λειτούργησαν σε επίγεια εργαστηριακά περιβάλλοντα με συμβατική βαρύτητα, ανοικτή ατμόσφαιρα και δυνατότητα ανθρώπινης παρέμβασης. Αυτό ακριβώς καθορίζει το απόλυτο, κοινό τεχνολογικό κενό ολόκληρου του Άξονα Α3 — η απουσία επικύρωσης (validation) σε ακραία διαστημικά περιβάλλοντα καθιστά τις τεχνολογίες αυτές χαμηλού TRL για άμεση διαστημική εφαρμογή χωρίς δραστικές τροποποιήσεις [104], [105], [106], [108].

3.3.5 Σύνθεση: Η Πιο Μεταφερόμενη Τεχνολογία και οι Τρεις Αναγκαίες Μετατροπές

Με βάση τη συγκριτική ανάλυση, η τεχνολογία που αξιολογείται ως πλησιέστερη σε άμεση διαστημική ενσωμάτωση είναι ο συνδυασμός αυτοματοποιημένης online κυτταρομετρίας ροής υψηλής ανάλυσης (FCM) με πλήρως αυτοματοποιημένη end-to-end IoT αρχιτεκτονική. Η ικανότητα του FCM να ανιχνεύει βιολογικές διαταραχές σε πραγματικό χρόνο σε επίπεδο κυττάρου είναι κρίσιμη για συστήματα υποστήριξης ζωής, όπου μια μικροβιακή μόλυνση σε κλειστό οικοσύστημα χωρίς άμεση ανίχνευση θα ήταν καταστροφική. Το ADA αξιολογείται ως το πιο απομακρυσμένο από άμεση διαστημική εφαρμογή στην τρέχουσα μορφή του, λόγω εξάρτησης από ανθρώπινη παρέμβαση.

Για να καταστεί εφικτή η μεταφορά τεχνολογίας από τον Άξονα Α3 στο διάστημα, απαιτούνται τρεις θεμελιώδεις μετατροπές:

1. Ανεξαρτητοποίηση από τη βαρύτητα. Η ανταλλαγή αερίων και η τροφοδοσία ρευστών πρέπει να απεξαρτηθούν από την άνωση φυσαλίδων και τον ψεκασμό νερού. Απαιτείται μετάβαση σε μεμβράνες διάχυσης αερίων χωρίς φυσαλίδες και φυγοκεντρικά/πιεσμένα κυκλώματα ρευστών.

2. Αυστηρά κλειστά μικρορευστομηχανικά κυκλώματα. Η δειγματοληψία με ρομπότ από ανοικτές φιάλες (όπως στο FCM) πρέπει να αντικατασταθεί από απόλυτα στεγανοποιημένα in-line κυκλώματα αισθητήρων που αποτρέπουν διαρροή υγρών στην κλειστή ατμόσφαιρα σε συνθήκες μικροβαρύτητας.

3. Πλήρης λογισμική αυτονομία και εφεδρεία. Λογισμικά επεξεργασίας (όπως το ADA) πρέπει να εξελιχθούν από εργαλεία χειροκίνητης εισαγωγής δεδομένων σε ρουτίνες on-edge processing ενσωματωμένες στον μικροελεγκτή, με fault tolerance και ελαχιστοποίηση χρόνου πληρώματος.

Το κεντρικό συμπέρασμα του Άξονα Α3 είναι ότι τα CEA εργαλεία αποτελούν αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη για αυτόνομα BLSS. Η τεχνολογική βάση υπάρχει και είναι αξιόλογη, αλλά το χάσμα μεταφοράς (technology transfer gap) είναι θεμελιώδες. Απαιτεί όχι απλή προσαρμογή αλλά ριζικό επανασχεδιασμό των φυσικών μηχανισμών λειτουργίας. Η διαπίστωση αυτή συνδέεται άμεσα με το ερευνητικό ερώτημα της παρούσας διατριβής: η αρχιτεκτονική IoST για αυτόνομα διαστημικά συστήματα δεν μπορεί να

αντιγράψει αυτούσια τη γήινη CEA τεχνολογία, αλλά πρέπει να την επανασχεδιάσει από τη θεμελιώδη παραδοχή της βαρύτητας.

3.4 Άξονας A4: Ανασκοπήσεις και Γενικές Μελέτες — Η Μνήμη και ο Οδικός Χάρτης του Πεδίου

Ο τέταρτος θεματικός άξονας συγκεντρώνει 8 ανασκοπήσεις και γενικές μελέτες που παρέχουν συνθετική θεώρηση του πεδίου, χαρτογραφώντας την ιστορική εξέλιξη του, το τρέχον τεχνολογικό επίπεδο και τα κρίσιμα κενά που δεν έχουν αντιμετωπιστεί από τους άλλους τρεις άξονες. Αποτελεί, κατά ουσιαστικό τρόπο, τη «μνήμη» του πεδίου συγκεντρώνει πέντε δεκαετίες βιβλιογραφίας, εντοπίζει τι παραμένει σχετικό, τι έχει ξεπεραστεί, τι επιστρέφει με νέα μορφή, και τι λείπει ακόμα από μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική αυτόνομων συστημάτων υποστήριξης ζωής.

Από άποψη τεχνολογικής ωριμότητας (TRL), το βιβλιογραφικό σώμα παρουσιάζει ευρύ φάσμα — από TRL 3–4 για εννοιολογικούς σχεδιασμούς τριών σταδίων, έως TRL 5–7 για καθιερωμένες τεχνολογίες (*Spirulina*, υδροπονία, LED) και TRL 4–6 για δοκιμασμένα σε ISS συστήματα φωτοβιοαντιδραστήρων. Η κατανομή αυτή αντικατοπτρίζει μια τεχνολογικά ανώμαλη ωριμότητα: επιμέρους στοιχεία είναι ώριμα, αλλά η ολοκλήρωσή τους σε ενιαίο αυτόνομο σύστημα παραμένει σε χαμηλό TRL [72], [77], [110], [111], [112].

3.4.1 Ιστορική Εξέλιξη: Από τη Χλωρέλλα στο Bio-ISRU

Η ιστορία της διαστημικής γεωργίας αρχίζει στις δεκαετίες 1950–1960 με επίκεντρο τη χρήση μικροφυκών, κυρίως της *Chlorella*, για παραγωγή O_2 και απομάκρυνση CO_2 στα προγράμματα της Αμερικανικής Πολεμικής Αεροπορίας, της NASA και του σοβιετικού διαστημικού προγράμματος. Το πρώτο μικροφύκος εκτοξεύτηκε σε τροχιά το 1960 από τη Σοβιετική Ένωση. Όμως, δύο προβλήματα οδήγησαν σε στροφή προς τα ανώτερα φυτά: η αδυναμία μετατροπής των φυκών σε εύγευστη τροφή και η ανακάλυψη ότι ορισμένα είδη παρήγαγαν τοξικές πτητικές ενώσεις που ανέκοπταν την ανάπτυξη άλλων φυτών στα κλειστά οικοσυστήματα [111].

Η περίοδος 1970–1980 σηματοδεύτηκε από το ρωσικό πρόγραμμα BIOS-3, μια ερμητικά σφραγισμένη εγκατάσταση τεσσάρων διαμερισμάτων στη Σιβηρία. Το πλήρωμα, το οποίο αποτελούνταν από τρία άτομα, έζησε έως έξι μήνες μέσα στην εγκατάσταση. Οι

καλλιέργειες σιταριού και λαχανικών κάλυπταν το 100% των αναγκών σε O_2 και το 70–80% των αναγκών σε τροφή — επίδοση που παραμένει αξιοσημείωτη. Το αμερικανικό Biosphere 2, στις αρχές της δεκαετίας του 1990, αντιμετώπισε σοβαρές τεχνικές δυσκολίες, κυρίως απώλεια O_2 λόγω αντιδράσεων με το σκυρόδεμα, αλλά παρήγαγε σημαντικά δεδομένα για κλειστά οικολογικά συστήματα μεγάλης κλίμακας [111].

Τρεις κρίσιμοι τεχνολογικοί σταθμοί ορίζουν τη μετάβαση από τα ιστορικά προγράμματα στη σύγχρονη εποχή. Πρώτον, η ενσωμάτωση φωτισμού LED για την ανάπτυξη φυτών αναπτύχθηκε με χρηματοδότηση της NASA τη δεκαετία του 1990, αντικαθιστώντας ενεργοβόρους λαμπτήρες υψηλής έντασης που χρησιμοποιούνταν σε παλαιότερα συστήματα. Δεύτερον, η υιοθέτηση υδροπονικών συστημάτων, όπως η Τεχνική Θρεπτικού Υμενίου (NFT), και κάθετης γεωργίας στον Θάλαμο Παραγωγής Βιομάζας (BPC) της NASA αύξησε σημαντικά την παραγωγικότητα σε περιορισμένο όγκο. Τρίτον, αναπτύχθηκαν φωτοβιοαντιδραστήρες με ειδικές μεμβράνες αερισμού για αποτελεσματικότερη μεταφορά αερίων σε μικροβαρύτητα, τεχνολογία που επιδείχθηκε από το πείραμα ArtEMISS στον ISS το 2017 με ταυτόχρονη τηλεμετρία κυτταρικού μεταβολισμού [111].

Παράλληλα, τρεις ιδέες της εποχής εκείνης επιστρέφουν σήμερα ριζικά ανανεωμένες. Η αρχική πρόταση χρήσης μικροφυκών ως αποκλειστικής τροφής, που εγκαταλείφθηκε λόγω δύσπεπτων κυτταρικών τοιχωμάτων και άσχημης γεύσης, αναβιώνει μέσω Συνθετικής Βιολογίας: γενετικά τροποποιημένα στελέχη *Spirulina* και *Synechocystis* παράγουν βελτιωμένη γεύση, αυξημένους υδατάνθρακες μέσω στέρησης αζώτου και βιοφαρμακευτικά σκευάσματα. Η κάθετη γεωργία του BPC επέστρεψε ως παγκόσμια αγροτική τάση, ενώ η εξόρυξη πόρων από τον εξωγήινο ρεγόλιθο εξελίσσεται στο Bio-ISRU όπου «σιδηρόφιλα» κυανοβακτήρια βιο-αποσαθρώνουν πετρώματα Άρη-Σελήνης για να απελευθερώσουν μέταλλα και θρεπτικά συστατικά [111], [60], [72], [110].

3.4.2 Τρέχον Τεχνολογικό Επίπεδο: Ωριμο, Αναδυόμενο και Επείγον

Η ανάλυση των ανασκοπήσεων αναδεικνύει σαφή κατηγοριοποίηση τεχνολογιών ανά ωριμότητα. Στις ώριμες τεχνολογίες (TRL 5–7) κατατάσσονται η υδροπονία NFT, ο φωτισμός LED βελτιστοποιημένου φάσματος, η καλλιέργεια *Spirulina* για ECLSS και ο φωτοβιοαντιδραστήρας *Limnospira* για αναγέννηση αέρα. Στις αναδυόμενες τεχνολογίες (TRL 3–5) εντάσσονται τα ολοκληρωμένα συστήματα Bio-ISRU, η βιοπαραγωγή μεθανίου

μέσω μεθανογένεσης και η Συνθετική Βιολογία για βελτίωση μικροοργανισμών. Η κλιμάκωση (scaling up) των PBR από εργαστηριακή κλίμακα (<100 L) σε επίπεδο πλήρους πληρώματος παραμένει το πλέον επιτακτικό τεχνολογικό εμπόδιο [100], [102], [103].

Ο ελάχιστος βιώσιμος συνδυασμός τεχνολογιών για αποστολή 500 ημερών στον Άρη, για τον οποίο υπάρχει ευρεία συναίνεση στις ανασκοπήσεις, αρθρώνεται γύρω από αρχιτεκτονική τριών σταδίων:

Στάδιο 1 — βιο-αποσάθρωση ρεγόλιθου από σιδηρόφιλα κυανοβακτήρια

Στάδιο 2 — φωτοβιοαντιδραστήρες μικροοργανισμών (Spirulina, Chlorella) που παράγουν O₂ και εδώδιμη βιομάζα αξιοποιώντας CO₂ πληρώματος και θρεπτικά Σταδίου 1

Στάδιο 3 — μεθανογόνα βακτήρια για παραγωγή βιοκαυσίμου (μεθανίου) από περίσσεια βιομάζας.

Αυτό το σύστημα τριών σταδίων συμπληρώνεται υποχρεωτικά από υβριδικά φυσικοχημικά συστήματα (αντιδραστήρας Sabatier, ηλεκτρόλυση νερού, μονάδες δέσμευσης CO₂ με ζεόλιθο - CDRA) που παρέχουν εφεδρεία για περιπτώσεις βιολογικής αστοχίας. Κρίσιμη διατροφική παρατήρηση: η βάση σε μικροφύκη δεν επαρκεί μόνη της ενώ η υψηλή πρωτεΐνη δημιουργεί κίνδυνο συσσώρευσης ουρικού οξέος και πέτρα στα νεφρά, οπότε απαιτείται συνδυασμός με αποθηκευμένα τρόφιμα και στέρηση αζώτου για αύξηση υδατανθράκων [100].

Η αρχιτεκτονική αυτή έχει υψηλή συνθετική αξία, αλλά πρέπει να διαβαστεί ως εννοιολογικός οδικός χάρτης και όχι ως πειραματικά επικυρωμένο σύστημα. Οι εργασίες των Keller κ.ά. δεν παρέχουν νέα δεδομένα από ενιαίο BLSS πλήρους κλίμακας, ούτε επιλύουν πειραματικά τις πιθανές αρνητικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διασυνδεδεμένων βιοαντιδραστήρων, όπως βιοϋμένια, cross-talk μεταβολιτών, γενετική αστάθεια και ανάγκη χειροκίνητης συντήρησης. Έτσι, η συμβολή τους έγκειται κυρίως στη χαρτογράφηση απαιτήσεων και όχι στην απόδειξη επιχειρησιακής ετοιμότητας [72], [110].

Τίτλος άρθρου	Τεχνολογία που παρουσιάζει	Τύπος καλλιέργειας	Εφαρμογή	Διασ. Εφαρμ.	Εκτίμηση TRL

Cyanobacteria and microalgae in supporting human habitation on Mars	Φωτοβιοαντιδραστήρες (PBRs), ISRU, 3D εκτύπωση βιοπολυμερών	Μικροαλγές	Μοντελοποίηση / Παρακολούθηση	Ναι	TRL 4-6 (Δοκιμές πιλοτικής κλίμακας και LEO)
Recent developments in the production and utilization of photosynthetic microorganisms for food applications	PBRs (tubular, bag), Συνθετική Οικολογία (consortia), CRISPR	Μικροαλγές / Άλλο (Βακτήρια)	Παρακολούθηση / Μοντελοποίηση	Ναι	TRL 4-5 (Εργαστηριακό/ Πιλοτικό στάδιο)
Agriculture for space: People and places paving the way	Υδροπονία (NFT), Φωτισμός LED, Κάθετη Γεωργία, Θάλαμοι υποβαρικής πίεσης	Φυτά / Μικροαλγές	Έλεγχος / Παρακολούθηση	Ναι	TRL 6-7 (Εκτεταμένες δοκιμές σε BIOS-3, BPC, ISS)
Prospects for creation of autonomous life support complexes using biological systems for arctic and far north conditions	Κλειστά Οικολογικά Συστήματα (όπως MELiSSA, BIOS-3)	Φυτά / Μικροαλγές / Άλλο (Ζώα)	Μοντελοποίηση / Έλεγχος	Ναι (και προσαρμολογία για Αρκτική)	TRL 4-5 (Προσαρμογή υπαρχουσών διαστημικών τεχνολογιών)
Use of Photobioreactors in Regenerative Life Support Systems for Human Space Exploration	Φωτοβιοαντιδραστήρες μεμβρανών, Συστήματα τηλεμετρίας, Διαχωρισμός αερίων/υγρών	Μικροαλγές	Παρακολούθηση / Μοντελοποίηση	Ναι	TRL 4-6 (Πιπτικές δοκιμές όπως το ArtEMISS στον ISS)
Biologically-based and physiochemical life support and in situ resource utilization for exploration of the solar system— reviewing the current state and defining future development needs	Σύστημα 3-σταδίων BLSS/ISRU, Βιο-αποσάθρωση, Μεθανογένεση	Μικροαλγές / Άλλο (Αρχαία, Μύκητες)	Αυτοματισμός / Έλεγχος	Ναι	TRL 3-4 (Εννοιολογικός σχεδιασμός και εργαστηριακή δοκιμή)
Cyanobacteria and Algal-Based Biological Life Support System (BLSS) and Planetary	Σύστημα 3-σταδίων BLSS, Βιο-αποσάθρωση ρεγόλιθου, PBRs	Μικροαλγές / Άλλο (Σιδηρόφιλα βακτήρια)	Αυτοματισμός / Παρακολούθηση	Ναι	TRL 3-4 (Εννοιολογικός σχεδιασμός)

Surface Atmospheric Revitalizing Bioreactor Brief Concept Review					
Wide Range Applications of Spirulina: From Earth to Space Missions	Καλλιέργεια Spirulina, Φαρμακευτικά / Διατροφικά συμπληρώματα	Μικροαλγές	Παρακολούθηση	Ναι	TRL 5-7 (Καθιερωμένο στη Γη, δοκιμασμένο για ECLSS στο διάστημα)

Πίνακας 3-8 TRL και διαστημική εφαρμοσιμότητα επιλεγμένων BLSS τεχνολογιών

Οι ακόλουθοι πίνακες τοποθετούνται στον Άξονα Α4, επειδή αποτυπώνουν την τεχνολογική ωριμότητα και τις στρατηγικές κατευθύνσεις που προκύπτουν από τις ανασκοπήσεις και τους οδικούς χάρτες του βιβλιογραφικού σώματος.

Καλλιέργεια / πρότυπος οργανισμός	Στόχος θρεπτικού συστατικού / μεταβολίτη	Μέθοδος βιοενίσχυσης	Σύστημα ανάπτυξης / εξοπλισμός	Αναφερόμενο αποτέλεσμα	Αναφορές
Μαρούλι (Lactuca sativa)	Ασβέστιο (Ca)	Γενετική: έκφραση του μεταφορέα Arabidopsis H ⁺ /Ca ²⁺ SCAX1	Θερμοκήπιο / γήινη μελέτη	25–32% περισσότερο Ca από τους μάρτυρες· εύρωστη ανάπτυξη και γόνιμα φυτά.	[40]
Μαρούλι (Lactuca sativa)	Φυλλικό οξύ (βιταμίνη B9)	Γενετική: έκφραση συνθετικού, βελτιστοποιημένου ως προς κωδικόνια γονιδίου GTP-cyclohydrolase I	—	2,1–8,5 φορές υψηλότερη περιεκτικότητα σε φυλλικό οξύ από μη διαγονιδιακές γραμμές.	[40]
Μαρούλι (Lactuca sativa)	Παραθυρεοειδής ορμόνη (PTH)	Γενετική: εισαγωγή γονιδίου PTH-Fc μέσω Agrobacterium	—	Μέση έκφραση PTH 10–12 mg/kg· πιθανή συμβολή στην αποφυγή οστικής απώλειας/οστεοπόρωσης στους αστροναύτες.	[40]
Μαρούλι (Lactuca sativa)	Σίδηρος (Fe)	Γενετική: υπερέκφραση φερριτίνης	—	1,2–1,7 φορές υψηλότερη περιεκτικότητα Fe· 27–42% μεγαλύτερη βιομάζα και υψηλότεροι φωτοσυνθετικοί ρυθμοί.	[40]

Κόκκινο ρωμαϊκό μαρούλι	Fe, K, Na, P, S και Zn	—	VEGGIE	Γενική ομοιότητα με τους γήινους μάρτυρες· διαφορές σε ορισμένα ανόργανα στοιχεία και ολικές φαινόλες, χωρίς διαφορά στα επίπεδα ανθοκυανινών.	[114]
Τομάτα (MicroTom)	Ανθοκυανίνες	Γενετική: έκφραση του γονιδίου <i>Petunia hybrida</i> PhAN4	Υδροπονικό σύστημα / πηγή γ- ακτινοβολίας ⁶⁰ Co	Ανοχή σε δόσεις 0,5 και 5 Gy· ενισχυμένη αντιοξειδωτική ικανότητα· διατήρηση λόγου παραγωγικότητας/μεγέθους υπό προσομοιωμένη διαστημική ακτινοβολία.	[115]
Μικροάλγη (<i>Haematococcus pluvialis</i>)	Ασταξανθίνη	Αγρονομική: επαγωγική έκφραση / καλλιέργεια υψηλής πυκνότητας	Φωτοζυμωτήρ ες / βιοαντιδραστή ρες	Ισχυρή αντιοξειδωτική δράση· αποτελεσματική εξουδετέρωση ελευθέρων ριζών και μείωση συσσώρευσης γηρασμένων κυττάρων λόγω διαστημικής ακτινοβολίας.	[68]
Μικροάλγη (<i>Limnospira indica</i>)	Φυσικά προϊόντα / βιομάζα	Αγρονομική: φυσική αντοχή σε στρες	Φωτοβιοαντιδ ραστήρες	Ισχυρή αντοχή στην ακτινοβολία· επιβίωση τουλάχιστον σε 6.400 Gy γ-ακτινοβολίας.	[30]
Κινέζικο λάχανο (<i>Brassica rapa</i>)	Θρεπτική βιομάζα	Αγρονομική: περιβαλλοντικός έλεγχος	VEGGIE	Παρατηρήθηκε αναστολή ανάπτυξης υπό συνεχώς αυξημένο CO ₂ , συνθήκη συχνή στον ISS.	[114]
Φακή του νερού (duckweed)	Φαρμακευτικά προϊόντα και εμβόλια	Γενετική: πλατφόρμα συνθετικής βιολογίας	Υδροπονικοί θάλαμοι mG- Lilypond	Υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη (20–35%)· δυνατότητα υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους παραγωγής φαρμάκων επιτόπου.	[116]
<i>Gynura bicolor</i> DC	Υδατάνθρακες, Ca, Cu, Fe, Zn	Αγρονομική: σύστημα παροχής θρεπτικών με πορώδεις σωλήνες	PTNDS έναντι παραδοσιακού υδροπονικού συστήματος (HGS)	Αύξηση θερμίδων (139,5 σε 182,3 kJ/100 g) και υδατανθράκων (4,8 σε 7,3 g/100 g)· αυξημένα Ca, Cu, Fe, Zn· χαμηλότερη λιγνίνη σε φύλλα και βλαστό.	[35]
Πατάτα (<i>Solanum tuberosum</i>) cv. Annabelle	Cu, Zn, P	Αγρονομική: διαχείριση υδροπονικού θρεπτικού διαλύματος	Τεχνική θρεπτικού φίλμ (NFT)	Απόδοση 1,45 kg/m ² · υψηλές συγκεντρώσεις Cu, Zn και P έναντι τυπικών βάσεων δεδομένων· μη ανίχνευση γλυκοαλκαλοειδών (σολανίνη/χακονίνη).	[34]
Πατάτα (<i>Solanum tuberosum</i>) cv. Bintje	Cu, Zn, P	Αγρονομική: διαχείριση υδροπονικού θρεπτικού διαλύματος	Τεχνική θρεπτικού φίλμ (NFT)	Απόδοση 1,355 kg/m ² · υψηλότερη συνολική ξηρή βιομάζα· υψηλό Cu (3,5 mg/100 g) και P (98,5 mg/100 g).	[34]

Πατάτα (<i>Solanum tuberosum</i>) cv. Desiree	Cu, Zn, P	Αγρονομική: διαχείριση υδροπονικού θρεπτικού διαλύματος	Τεχνική θρεπτικού φιλμ (NFT)	Υψηλότερη μη εδωδιμη βιομάζα (βλαστός και ρίζα, DW)· απόδοση 0,545 kg/m ² · υψηλή περιεκτικότητα P (142 mg/100 g).	[34]
Πατάτα (<i>Solanum tuberosum</i>) cv. Innovator	Cu, Zn, P	Αγρονομική: διαχείριση υδροπονικού θρεπτικού διαλύματος	Τεχνική θρεπτικού φιλμ (NFT)	Παραγωγή μεγαλύτερων κονδύλων (20,95 g/κόνδυλο)· απόδοση 0,940 kg/m ² · υψηλό Zn (1,20 mg/100 g) και P (169 mg/100 g).	[34]

Πίνακας 3-9 Στρατηγικές διαστημικής γεωργίας και βιοενίσχυση πρότυπων καλλιεργειών

3.4.3 Κρίσιμα Τεχνολογικά Κενά: Συναίνεση και Διαφοροποιήσεις

Οι ανασκοπήσεις εντοπίζουν τέσσερα κατηγορίες κρίσιμων κενών, με ευρεία συναίνεση στα πρώτα δύο και διαφοροποιήσεις ως προς το ποιο είναι το πλέον επείγον.

1. Διαχείριση ρευστών σε μικροβαρύτητα. Σε περιβάλλον έλλειψης βαρύτητας, ο διαχωρισμός αερίου-υγρού καταρρέει καθώς η καθίζηση απουσιάζει και η μεταφορά μάζας περιορίζεται στη διάχυση. Απαιτούνται τεχνολογίες διαχωρισμού μέσω τριχοειδών φαινομένων ή ακουστικών κυμάτων (πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς) [112],[110].

2. Κλιμάκωση φωτοβιοαντιδραστήρων. Τα σημερινά συστήματα περιορίζονται σε εργαστηριακή-πilotική κλίμακα (<100 L) και δεν επαρκούν για πλήρη κάλυψη αναγκών πληρώματος. Η φυσική διασύνδεση σε κλειστό βρόχο μεγάλου όγκου, χωρίς αρνητικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ υποσυστημάτων ακόμα δεν έχει αποδειχθεί πειραματικά [72], [112].

3. Μακροχρόνια γενετική σταθερότητα μικροοργανισμών. Δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για το πώς πολλαπλές γενιές μικροφυκών ενδέχεται να μεταλλαχθούν ή να χάσουν την ικανότητα παραγωγής O₂ υπό κοσμική ακτινοβολία σε βάθος χρόνου [110], [112].

4. Πλανητική προστασία και ενεργειακή τροφοδοσία. Η ασφαλής εισαγωγή αρεϊκού ρεγόλιθου στους βιοαντιδραστήρες (πρόσθια μόλυνση) απαιτεί ειδικά αεροφράγματα, UV απολύμανση και Q-suits. Η ενεργειακή τροφοδοσία σε αμμοθύελλες ή έκλειψη απαιτεί αξιόπιστα FSPS ή RTG [110].

3.4.4 Αρχές Σχεδιασμού για Ανθεκτικά Συστήματα

Οι ανασκοπήσεις συγκλίνουν σε μια κεντρική αρχή σχεδιασμού. Τα BLSS πρέπει να ακολουθούν τα κριτήρια μηχανικής RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Supportability) που ισχύουν για τα διαστημικά σκάφη, προσαρμοσμένα στις ιδιαιτερότητες των ζωντανών οργανισμών [110], [112].

Η αρθρωτή αρχιτεκτονική (modularity) αποτελεί τον κεντρικό πυλώνα αντιμετώπισης βιολογικής αστοχίας. Αντί ενός τεράστιου PBR, χρησιμοποιούνται πολλαπλές μικρότερες μονάδες που λειτουργούν παράλληλα ή σε εναλλασσόμενες παρτίδες. Αν μια καλλιέργεια καταρρεύσει, οι υπόλοιπες συνεχίζουν και η προβληματική μονάδα αποσυνδέεται ομαλά (graceful degradation) χωρίς ολική κατάρρευση. Κοινά, εναλλάξιμα εξαρτήματα μεταξύ μονάδων διατηρούν μικρή λίστα ανταλλακτικών και απλοποιούν αποστολή επισκευής. Η βιολογική εφεδρεία διαφέρει θεμελιωδώς από τη μηχανική σε δύο κρίσιμα σημεία. Πρώτον, χρόνος απόκρισης: ενώ ένα μηχανικό εφεδρικό σύστημα (π.χ. δεξαμενή O_2) έχει ακαριαία αποτελέσματα, τα βιολογικά συστήματα δεν λειτουργούν σαν «διακόπτης» λογού χάρη οποιαδήποτε αύξηση παραγωγής O_2 απαιτεί βιολογικό χρόνο ανάπτυξης βιομάζας. Δεύτερον, κόστος εφεδρείας σε μάζα: η μηχανική εφεδρεία απαιτεί φυσικά ανταλλακτικά από τη Γη (γυάλινοι σωλήνες, LED) που δεν μπορούν να κατασκευαστούν 3D στο σύνολό τους. Η βιολογική εφεδρεία πλεονεκτεί: λυοφιλιωμένες (freeze-dried) καλλιέργειες καταλαμβάνουν ελάχιστο χώρο και έχουν τη μοναδική ιδιότητα να αυτοαναπαράγονται. Ένα μικρό φιαλίδιο μπορεί να επαναποικίσει βιοαντιδραστήρες χιλιάδων λίτρων [110].

Σχετικά με την απλότητα σχεδιασμού (πνεύμα KISS), οι ερευνητές αναζητούν την ισορροπία μεταξύ απλότητας και αξιοπιστίας. Ο PBR τύπου «πλαστικής σακούλας» είναι η πιο απλή λύση αλλά εξαιρετικά εύθραυστος σε διαστημικές συνθήκες, ενώ οι σωληνωτοί (tubular) και επίπεδοι (flat-panel) σχεδιασμοί διατηρούν σχετική απλότητα με πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία και ευκολία καθαρισμού [60], [60], [117].

3.4.5 Αυτονομία: Τρέχουσα Κατάσταση και Απαιτήσεις

Καμία ανασκόπηση δεν παρουσιάζει επίσημη τυπολογία επιπέδων αυτονομίας για BLSS, αλλά όλες περιγράφουν σαφή κλίμακα από «εποπτευόμενη» έως «πλήρως αυτόνομη» λειτουργία. Τα σημερινά BLSS κατατάσσονται σε εποπτευόμενο/ημιαυτόνομο επίπεδο. Τα πειράματα στον ISS αντιμετωπίζουν διαρροές, διακοπές ρεύματος και έλλειψη

online παρακολούθησης, ενώ κρίσιμες εργασίες (προσθήκη ρεγόλιθου, συγκομιδή βιομάζας) απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση με στολές τύπου BSL-4.

Τα μελλοντικά BLSS πρέπει να λειτουργούν πλήρως αυτόνομα δύο χρόνια πριν από την άφιξη του πληρώματος στον Άρη, παράγοντας και αποθηκεύοντας O₂, τροφή και μεθάνιο. Κρίσιμη ικανότητα είναι να υπάρχει ρύθμιση αδράνειας (dormancy) των καλλιεργειών μέσω μείωσης θερμοκρασίας (π.χ. 17°C για *Spirulina*) όταν οι αποθηκευτικοί χώροι γεμίσουν πριν φτάσουν οι αστροναύτες. Για αυτόν τον σκοπό, απαιτούνται αξιόπιστα συστήματα τηλεμετρίας και απομακρυσμένου ελέγχου από τη Γη, καθώς και αυτοματοποιημένα συστήματα καθαρισμού για αντιμετώπιση βιοφίλμ στα τοιχώματα αντιδραστήρων χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση [110], [112].

3.4.6 Σύγκριση Περιβάλλοντος: ISS, Σελήνη και Άρης

Οι ανασκοπήσεις αναδεικνύουν σαφείς ποιοτικές και ποσοτικές διαφορές ανά περιβάλλον. Ποιοτικά, η κυρίαρχη πρόκληση στον ISS είναι η μικροβαρύτητα γιατί καταρρέει ο διαχωρισμός αερίου-υγρού και η υδροπονία γίνεται εξαιρετικά πολύπλοκη. Σελήνη και Άρης διαθέτουν μερική βαρύτητα (16,6% και 37,8% της γήινης αντίστοιχα), που επιτρέπει βαρύτητα-βασισμένους μηχανισμούς άρδευσης και διαχωρισμού. Η Σελήνη στερείται ατμόσφαιρας και οργανικών ενώσεων για ISRU, ενώ ο Άρης διαθέτει ατμόσφαιρα 95% CO₂ αλλά εισάγει το μοναδικό πρόβλημα τοξικότητας υπερχλωρικών αλάτων ρεγόλιθου [60], [112].

Μεταξύ των αναλογικών προγραμμάτων, το κινεζικό Lunar Palace 1 αξιολογείται ως το πιο αντιπροσωπευτικό για μελλοντικές αποστολές: κατά τη δοκιμή 105 ημερών ενσωμάτωσε φυτικές καλλιέργειες, παραγωγή ζωικής πρωτεΐνης (έντομα) και μικροβιακή βιομετατροπή στερεών αποβλήτων, επιτυγχάνοντας 100% αναγέννηση O₂ και νερού και 55% κάλυψη αναγκών σε τροφή για τρία μέλη, ξεπερνώντας κάθε προηγούμενη δοκιμή βιοαναγεννητικού συστήματος. Το MELiSSA Pilot Plant στη Βαρκελώνη επικύρωσε κλειστό βρόχο βιοαντιδραστήρων με PBR 83 L που συντήρησε αρουραίους για μήνες, ενώ το EDEN ISS (Neumayer III, Ανταρκτική) επικύρωσε συστήματα καλλιέργειας σε ακραία απομονωμένα περιβάλλοντα [111], [112], [112].

3.4.7 Οδικός Χάρτης και Ενοποιημένη Θεώρηση

Βάσει των ανασκοπήσεων, ένας οδικός χάρτης για αυτόνομα BLSS δομείται γύρω από τρία ορόσημα. Το πρώτο με χρονικό ορίζοντα 2 χρόνια πριν άφιξη πληρώματος, αφορά την

Προ-εγκατάσταση και Αυτόνομη Λειτουργία, τα συστήματα BLSS/ISRU αναπτύσσονται στον Άρη/Σελήνη και λειτουργούν πλήρως αυτόνομα, δημιουργώντας αποθέματα πόρων. Το δεύτερο με άφιξη πληρώματος 500+ ημέρες, αφορά Κλιμάκωση Παραγωγής και Υβριδική Υποστήριξη, ενεργοποίηση Σταδίου 2, παραγωγή O_2 και βιομάζα, επίλυση διαχωρισμού αερίου-υγρού, ταυτόχρονη λειτουργία φυσικοχημικών συστημάτων εφεδρείας. Το τρίτο για προετοιμασία επιστροφής, αφορά Ολικό Κλείσιμο Κύκλου και Παραγωγή Βιοκαυσίμων όπου μεθανογόνα βακτήρια παράγουν ~8 τόνους μεθανίου για DAV, με αυστηρά πρωτόκολλα πλανητικής προστασίας (αεροφράγματα, UV απολύμανση, Q-suits) [72], [112].

Η ανασκόπηση των Keller κ.ά. (2021) αξιολογείται ως η πλησιέστερη σε ενοποιημένη θεώρηση ολοκληρωμένου αυτόνομου συστήματος και εισάγει ρητά την αρχιτεκτονική τριών σταδίων, ενσωματώνει φυσικοχημική εφεδρεία, αναλύει ρεαλιστικά σενάρια αποστολών (Mars DRA 5.0) και περιλαμβάνει παραμέτρους bio-containment και ενεργειακής τροφοδοσίας. Όμως, ακόμα και αυτή η πιο ολοκληρωμένη ανασκόπηση παρουσιάζει τέσσερα κενά:

α) Πραγματική φυσική διασύνδεση-κλιμάκωση. Δεν υπάρχουν δεδομένα για τη συμπεριφορά ολόκληρου του κλειστού βρόχου μεγάλου όγκου, χωρίς αρνητική αλληλεπίδραση cross-talk μεταξύ υποσυστημάτων.

β) Quorum sensing και βιοφίλμ. Οι συνέπειες της κυτταρικής επικοινωνίας και της δημιουργίας ανεπιθύμητων βιοφίλμ κατά τη διασύνδεση αντιδραστών αγνοούνται εν πολλοίς.

γ) Μακροχρόνια γενετική σταθερότητα. Απουσιάζουν δεδομένα πολυετούς ακτινοβολήσης για γενετικές μεταλλάξεις μικροοργανισμών σε λειτουργία BLSS.

δ) Τεχνολογίες πλήρους αυτοματοποίησης συντήρησης. Οι τρέχουσες υποθέσεις βασίζονται σε χειροκίνητη παρέμβαση αστροναυτών με BSL-4 στολές — κατανάλωση πολύτιμου χρόνου πληρώματος που η διατριβή καλείται να αντιμετωπίσει.

ε) Η πλήρης αυτοματοποίηση συντήρησης BLSS χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση — αποτελεί το κεντρικό ερευνητικό κενό που γεφυρώνει η παρούσα διατριβή. Η ανάπτυξη αρχιτεκτονικής IoST με αυτόνομο έλεγχο, ανίχνευση ανωμαλιών και αυτοματοποιημένη αντίδραση για BLSS στο διάστημα δεν έχει αντιμετωπιστεί από καμία από τις οκτώ

ανασκοπήσεις του Άξονα Α4, επιβεβαιώνοντας το ερευνητικό κενό που καθορίστηκε στην Ενότητα 1.3 της παρούσας εργασίας.

Η διαξονική σύνθεση δείχνει ότι οι τέσσερις άξονες δεν έχουν την ίδια αποδεικτική ισχύ. Ο Α1 διαθέτει το ισχυρότερο βιολογικό και πειραματικό υπόβαθρο, με δοκιμές σε ISS, PBR και εξωτερική έκθεση. Ο Α2 προσφέρει τεχνολογική κατεύθυνση για IoST, AI και edge/cloud, αλλά στηρίζεται συχνά σε επίγεια ή προσομοιωτικά συστήματα. Ο Α3 λειτουργεί ως γέφυρα από τη Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος προς το διάστημα. Ο Α4 δίνει ιστορική μνήμη και οδικό χάρτη, όχι πλήρη πειραματική επικύρωση.

Άξονας	Άρθρα	Κύριο αντικείμενο	Κυρίαρχες τεχνολογίες/έννοιες	Κεντρικό ερευνητικό κενό
A1	97	Βιολογικό υπόβαθρο BLSS/ECLSS, μικροφύκη, κυανοβακτήρια, ανώτερα φυτά και βιο-ISRU.	MELiSSA, φωτοβιοαντιδραστήρες, Limnospira/Chlorella/Chroococcidiopsis, ISS/Artemis, βιο-ISRU.	Κλιμάκωση, ολοκλήρωση BLSS με ECLSS, αξιοπιστία και πλήρης αυτοματοποίηση.
A2	15	Ψηφιακό και υπολογιστικό επίπεδο της διαστημικής γεωργίας.	IoST, edge/cloud, CubeSats, αισθητήρες IoT, τεχνητή νοημοσύνη, MARL, αυτόνομη υδροπονία.	Έλλειψη δοκιμών σε πραγματικό διαστημικό περιβάλλον και απουσία ενιαίων σημείων αναφοράς.
A3	7	Επίγειες τεχνολογίες CEA ως γέφυρα προς το διάστημα.	Παρακολούθηση PBR, online κυτταρομετρία ροής, αεροπονία, λογισμικό ADA, αυτοματισμοί IoT.	Μεταφορά από εργαστηριακή/επίγεια ωριμότητα σε διαστημική αξιοπιστία.
A4	8	Ιστορική μνήμη, τεχνολογικός οδικός χάρτης και μακρο-σύνθεση του πεδίου.	BIOS-3, BPC, LED, υδροπονία, PBR, Spirulina, οδικοί χάρτες βιο-ISRU.	Ασυμμετρία μεταξύ ώριμων επιμέρους τεχνολογιών και χαμηλής ωριμότητας ολοκληρωμένων συστημάτων.

Πίνακας 3-10 Συγκριτική αποτύπωση των τεσσάρων θεματικών αξόνων

Η οριζόντια ανάγνωση των τεσσάρων αξόνων δείχνει ότι η διαστημική γεωργία μετατοπίζεται από την απλή δοκιμή οργανισμών σε έναν σύνθετο τεχνολογικό χώρο όπου βιολογία, συστήματα ελέγχου, αισθητήρες, τεχνητή νοημοσύνη και αρχιτεκτονικές υποστήριξης ζωής πρέπει να λειτουργούν ως ενιαίο σύστημα. Ο Άξονας A1 θεμελιώνει τη βιολογική δυνατότητα — μικροφύκη, κυανοβακτήρια και ανώτερα φυτά μπορούν να παράγουν οξυγόνο, βιομάζα, συμπληρωματική τροφή και πρώτες ύλες για βιο-ISRU. Ο Άξονας A2 δείχνει ότι αυτή η δυνατότητα δεν μπορεί να αξιοποιηθεί χωρίς υπολογιστική αυτονομία, καθώς οι καθυστερήσεις επικοινωνίας, η περιορισμένη ισχύς και η ανάγκη τοπικής λήψης αποφάσεων καθιστούν αναγκαία τη χρήση edge/cloud, IoST και AI. Ο Άξονας A3 προσφέρει την τεχνολογική γέφυρα από τη γήινη CEA προς το διάστημα, ενώ ο Άξονας A4 θέτει την ιστορική και στρατηγική προοπτική.

Το πρώτο βασικό κενό είναι η κλιμάκωση. Πολλές τεχνολογίες έχουν αποδειχθεί σε εργαστηριακή ή αναλογική κλίμακα, όμως ελάχιστες έχουν επιβεβαιωθεί σε κλίμακα πλήρους πληρώματος, με συνεχόμενη λειτουργία μηνών ή ετών. Αυτό αφορά τόσο τους φωτοβιοαντιδραστήρες μικροαλγών όσο και τα συστήματα ανώτερων φυτών. Η κλιμάκωση δεν είναι απλώς ζήτημα μεγέθους, αλλά ζήτημα σταθερότητας, βιοασφάλειας, αυτοματοποίησης, ενέργειας και συντήρησης.

Το δεύτερο κενό είναι η ολοκλήρωση BLSS-ECLSS. Το βιβλιογραφικό σώμα δείχνει ότι τα βιολογικά συστήματα είναι πολλά υποσχόμενα, αλλά δεν μπορούν να υποκαταστήσουν άμεσα τα φυσικοχημικά συστήματα υποστήριξης ζωής. Η ρεαλιστική κατεύθυνση είναι υβριδική — BLSS ως συμπληρωματικό και σταδιακά αυξανόμενο υποσύστημα που συνεργάζεται με υπάρχοντα ECLSS, αντί για πλήρης αντικατάσταση από την αρχή.

Το τρίτο κενό είναι η αξιοπιστία της αυτονομίας. Τα περισσότερα AI/IoT συστήματα του βιβλιογραφικού σώματος παραμένουν σε χαμηλό ή μεσαίο TRL και δεν διαθέτουν ενιαία πρωτόκολλα αξιολόγησης. Για μελλοντικές βάσεις Σελήνης και Άρη, η αυτονομία πρέπει να αποδειχθεί όχι μόνο ως δυνατότητα ελέγχου, αλλά ως επαληθεύσιμη, εξηγήσιμη και ανθεκτική συμπεριφορά υπό σφάλματα αισθητήρων, απώλεια επικοινωνίας, βιολογική αστάθεια και περιορισμένη ανθρώπινη παρέμβαση.

Το τέταρτο κενό αφορά τα δεδομένα. Παρότι το βιβλιογραφικό σώμα περιλαμβάνει μελέτες με αισθητήρες, τηλεμετρία, φωτοβιοαντιδραστήρες και cloud/edge πλατφόρμες,

απουσιάζουν μεγάλα ανοικτά datasets για συγκριτική εκπαίδευση και αξιολόγηση μοντέλων. Χωρίς τέτοια datasets, η ανάπτυξη AI για space agriculture παραμένει αποσπασματική και δύσκολα αναπαραγώγιμη.

Το πέμπτο κενό είναι η σύνδεση βιολογικής ερμηνευσιμότητας και υπολογιστικής απόφασης. Το βιβλιογραφικό σώμα δείχνει ότι τα συστήματα παρακολούθησης μπορούν ήδη να συλλέγουν pH, θερμοκρασία, αγωγιμότητα, διαλυμένο οξυγόνο, φθορισμό χλωροφύλλης, οπτική πυκνότητα και κυτταρομετρικά χαρακτηριστικά. Όμως, οι περισσότερες μελέτες παραμένουν σε επίπεδο μέτρησης ή στατιστικής ανάλυσης και δεν μεταφράζουν συστηματικά τις μετρήσεις σε βιολογικά ερμηνεύσιμες καταστάσεις, όπως φωτοαναστολή, θρεπτική ανεπάρκεια, επιμόλυνση, μεταβολική μετατόπιση, βιοφίλμ ή επικείμενη κατάρρευση καλλιέργειας. Αυτό το κενό είναι κρίσιμο διότι ένα αυτόνομο σύστημα δεν πρέπει απλώς να γνωρίζει ότι μια τιμή αποκλίνει, αλλά να μπορεί να ερμηνεύει τι σημαίνει η απόκλιση για τον οργανισμό και ποια παρέμβαση είναι βιολογικά ασφαλής.

Η διαξονική ανάγνωση δείχνει επίσης ότι τα ερευνητικά κενά δεν οφείλονται μόνο στην απουσία επιμέρους τεχνολογιών, αλλά και στην ετερογένεια της ίδιας της τεκμηρίωσης. Ο Άξονας A1 διαθέτει την ισχυρότερη πειραματική και διαστημική επαλήθευση, με πειράματα σε ISS και εξωτερική έκθεση, ενώ οι Άξονες A2 και A3 βασίζονται κυρίως σε επίγεια, αναλογικά ή προσομοιωτικά συστήματα. Ο Άξονας A4 λειτουργεί περισσότερο ως στρατηγικός οδικός χάρτης μέσω ανασκοπήσεων και concept papers. Επομένως, το τελικό βιβλιογραφικό σώμα δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ομοιογενές σύνολο αποδείξεων, αλλά ως σύνολο τεχνολογικών ενδείξεων διαφορετικής ωριμότητας που απαιτούν αρχιτεκτονική ενοποίηση, αξιολόγηση αξιοπιστίας και μηχανισμούς ανθεκτικότητας.

Έτσι, το βιβλιογραφικό σώμα υποστηρίζει μια σαφή ερευνητική κατεύθυνση — ανάπτυξη αξιόπιστων, αυτόνομων, βιολογικά ενημερωμένων και εξηγήσιμων συστημάτων ελέγχου για BLSS. Αυτά τα συστήματα πρέπει να συνδυάζουν αισθητήρες, μοντέλα, κανόνες ασφαλείας, AI agents, συνεχείς αξιολογήσεις και διαχείριση εμπιστοσύνης δεδομένων. Η προοπτική αυτή συνδέει άμεσα τη διαστημική γεωργία με την επόμενη γενιά MLOps/AgentOps για κυβερνο-φυσικά βιοσυστήματα.

Πεδίο	Κενό που αναδύεται από το βιβλιογραφικό σώμα	Μελλοντική κατεύθυνση
-------	--	-----------------------

Κλιμάκωση BLSS	Επιτυχείς εργαστηριακές δοκιμές αλλά περιορισμένες δοκιμές πλήρους κλίμακας.	Πολυμνημαία/πολυετή πειράματα σε αναλογικά habitats και στον ISS.
Ολοκλήρωση BLSS-ECLSS	Τα βιολογικά συστήματα παραμένουν συμπληρωματικά και όχι πλήρως επιχειρησιακά.	Υβριδικές αρχιτεκτονικές με σαφείς διεπαφές, πλεονασμό και fail-safe λειτουργία.
Τεχνητή νοημοσύνη και αυτονομία	Πολλά πρωτότυπα αλλά ελάχιστη διαστημική επαλήθευση.	Συγκριτική αξιολόγηση ελεγκτών AI σε σενάρια καθυστέρησης επικοινωνίας, αστοχιών αισθητήρων και βιολογικής μετατόπισης.
Δεδομένα	Έλλειψη ανοικτών, τυποποιημένων συνόλων δεδομένων διαστημικής γεωργίας.	Δημιουργία κοινόχρηστων συνόλων τηλεμετρίας και προτύπων δεδομένων.
Βιολογική ερμηνευσιμότητα	Οι αισθητήρες δεν μεταφράζονται πάντα σε βιολογικά νοήματα.	Εξηγήσιμοι soft sensors και επίπεδα λήψης αποφάσεων με επίγνωση αξιοπιστίας.
Bio-ISRU	Υποσχόμενο πεδίο αλλά χαμηλή τεχνολογική ωριμότητα.	Συνδυασμός κυανοβακτηρίων, ρεγόλιθου, συνθετικής βιολογίας και υλικών.

Πίνακας 3-11 Συνοπτική αποτύπωση ερευνητικών κενών και μελλοντικών κατευθύνσεων.

4 Συγκριτική Αξιολόγηση Αρχιτεκτονικών και Τεχνολογικών Κενών

Το παρόν κεφάλαιο μετατρέπει τα ευρήματα του Κεφαλαίου 3 από αφηγηματική βιβλιογραφική σύνθεση σε συγκριτικό πλαίσιο αξιολόγησης. Η ανάλυση βασίζεται αποκλειστικά στο τελικό βιβλιογραφικό σώμα των 127 συμπεριληφθεισών δημοσιεύσεων και δεν εισάγει εξωτερικές βιβλιογραφικές πηγές. Στόχος δεν είναι να αναδειχθεί απλώς ποιο σύστημα είναι τεχνικά πιο εξελιγμένο, αλλά να τεκμηριωθεί ποια αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά απουσιάζουν από τα υφιστάμενα συστήματα ώστε να είναι δυνατή μια πραγματικά αυτόνομη διαστημική γεωργία ακριβείας. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από τη σύγκλιση τριών γραμμών του βιβλιογραφικού σώματος: τα διαστημικά συστήματα καλλιέργειας παραμένουν κυρίως πειραματικές ή ημι-αυτόματες πλατφόρμες, τα BLSS έχουν υψηλή βιολογική αξία αλλά περιορισμένη επιχειρησιακή αυτονομία, και οι τεχνολογίες AI/IoST είναι πολλά υποσχόμενες αλλά δεν έχουν επικυρωθεί σε πραγματικές διαστημικές συνθήκες.

Η συγκριτική αξιολόγηση που ακολουθεί δεν αντιμετωπίζει τα συστήματα ως ανταγωνιστικά προϊόντα, αλλά ως διαφορετικά επίπεδα τεχνολογικής ωρίμανσης. Για τον λόγο αυτό, οι πίνακες δεν παράγουν συνολική αριθμητική κατάταξη ούτε μέσο όρο. Κάθε σύστημα αναλύεται ως προφίλ δυνατοτήτων και περιορισμών στους άξονες C1–C6. Η λογική είναι διαγνωστική: να φανεί πού υπάρχει τεχνολογική ωριμότητα, πού υπάρχουν μόνο επιμέρους δοκιμές, και πού παραμένει αρχιτεκτονικό κενό που πρέπει να καλυφθεί στα Κεφάλαια 5–6.

4.1 Μεθοδολογία συγκριτικής αξιολόγησης

Η σύγκριση ετερογενών συστημάτων — από ιστορικά φυτοδοχεία σε διαστημικούς σταθμούς έως φωτοβιοαντιδραστήρες, αναλογικά θερμοκήπια, IoST πρωτότυπα και κλειστά οικοσυστήματα — απαιτεί κοινή αναλυτική γλώσσα. Για τον λόγο αυτό υιοθετείται εξακριβητικό πλαίσιο C1–C6. Τα κριτήρια δεν λειτουργούν ως απόλυτες μετρήσεις απόδοσης, αλλά ως συγκριτική κανονικοποίηση των τεχνολογικών δυνατοτήτων που τεκμηριώνονται στο βιβλιογραφικό σώμα. Η βαθμολόγηση 1–10 είναι ποιοτική βαθμολόγηση βασισμένη στη συγκριτική ανάλυση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Δεν αποτελεί πειραματική μέτρηση, ούτε ισχυρίζεται ότι όλα τα συστήματα αξιολογήθηκαν με κοινό πρωτόκολλο. Η χρήση ποιοτικής κλίμακας είναι αναγκαία επειδή οι δημοσιεύσεις δεν παρέχουν ομοιογενείς μετρικές για όλα τα συστήματα [24], [45], [118].

Η κλίμακα 1–10 χρησιμοποιείται ως τακτική κλίμακα περιγραφικής ωριμότητας. Για τον λόγο αυτό δεν εξάγεται μέσος όρος από τα C1–C6: η αυτονομία, η ποιότητα αισθητήρων, η κλειστότητα κύκλου, η ενεργειακή απόδοση, η ανοχή σε αστοχίες και η επεκτασιμότητα είναι ετερογενείς διαστάσεις και δεν μπορούν να αθροιστούν ως ισοδύναμες ποσοτικές μεταβλητές. Αντί του μέσου όρου, η αξιολόγηση εστιάζει στο σχήμα του προφίλ: ποια κριτήρια είναι ισχυρά, ποια είναι ασθενή και ποια δημιουργούν το βασικό αρχιτεκτονικό κενό. Αυτή η προσέγγιση είναι πιο ασφαλής μεθοδολογικά, επειδή αποφεύγει ψευδή ακρίβεια και αναδεικνύει τις εσωτερικές ασυμμετρίες κάθε συστήματος. Ειδική διευκρίνιση απαιτείται για το κριτήριο C3 («Κλειστός βρόχος»). Στην παρούσα αξιολόγηση η κλειστότητα δεν νοείται αποκλειστικά ως απόλυτη θερμοδυναμική απομόνωση, διότι η πλήρης ανακύκλωση υλικών σε πολυετείς αποστολές θεωρείται πρακτικά ανέφικτη και οι απώλειες μάζας είναι αναπόφευκτες. Επομένως, το C3 αποτιμά λειτουργικά την ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί μακροπρόθεσμη αυτάρκεια και να μειώνει την εξάρτηση από τη γήινη αλυσίδα εφοδιασμού. Υπό αυτό το πρίσμα, η βιολογική ISRU δεν αναιρεί τον κλειστό βρόχο επειδή εισάγει τοπικούς πόρους, όπως CO₂ ή ρεγόλιθο· αντίθετα, λειτουργεί ως μηχανισμός αναπλήρωσης των αναπόφευκτων απωλειών και εξομοιώνει επιχειρησιακά το αποτέλεσμα ενός βιώσιμου κλειστού κύκλου.

Κάθε βαθμολογία αποδίδεται μόνο όταν υπάρχει τεκμηρίωση από το βιβλιογραφικό σώμα. Όταν ένα σύστημα δεν καλύπτεται από ειδική μονογραφική πηγή αλλά εμφανίζεται μέσα σε ανασκοπική ή ιστορική βιβλιογραφία, αυτό δηλώνεται ρητά και η βαθμολογία αντιμετωπίζεται ως συντηρητική εκτίμηση. Η επιλογή αυτή είναι κρίσιμη για συστήματα όπως το Lada/Svet ή τα γενικά ISS plant growth chambers, τα οποία εμφανίζονται κυρίως μέσω ευρύτερων review papers και όχι ως αυτόνομες τεχνικές εγγραφές

Κριτήριο	1–3: χαμηλή τεκμηρίωση/ικανότητα	4–6: μερική ή ημιόριμη ικανότητα	7–8: υψηλή αλλά όχι πλήρως αυτόνομη ικανότητα	9–10: απαίτηση πλήρους SPA αυτονομίας
C1 Αυτονομία λειτουργίας	Χειροκίνητη ή ground-in-loop λειτουργία· περιορισμένη onboard απόφαση.	Αυτοματισμός βάσει κανόνων, με αισθητήρες και τοπικούς ελεγκτές, αλλά ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης.	Προγνωστικός ή AI-assisted έλεγχος για ορισμένες λειτουργίες, χωρίς πλήρη fault recovery.	Αυτόνομη απόφαση σε καθυστερήσεις Moon/Mars, με ιεράρχηση κινδύνου και ασφαλείς fallback πολιτικές.

C2 Αισθητήρες και μετρήσεις	Λίγες περιβαλλοντικές μετρήσεις, κυρίως θερμοκρασία/υγρασία/φως.	Πολλαπλοί αισθητήρες μικροκλίματος, θρεπτικών ή εικόνας, χωρίς πλήρη βιολογική ερμηνεία.	Πολυαισθητηριακό sensing με plant-health ή κυτταρικούς δείκτες.	Sensor fusion με μικροκλίμα, θρεπτικά, εικόνα, PBR, βιολογικούς δείκτες και sensor-health scoring.
C3 Κλειστός βρόχος	Ανοιχτό ή ημι-ανοιχτό σύστημα χωρίς ουσιαστική ανακύκλωση.	Μερική ανακύκλωση νερού, θρεπτικών ή αερίων.	Ισχυρή ανακύκλωση συγκεκριμένων ροών, αλλά όχι πλήρης BLSS/ECLSS ολοκλήρωση.	Ολοκληρωμένη εποπτεία κύκλων CO ₂ /O ₂ /νερού/θρεπτικών/αποβλήτων.
C4 Ενεργειακή απόδοση	Υψηλή κατανάλωση ή έλλειψη βελτιστοποίησης.	Βασική αποδοτικότητα LED/PBR ή τοπικού ελέγχου.	Σχεδιασμός με έμφαση σε energy-aware λειτουργία και παραγωγικότητα.	Συνεχής energy-aware optimization σε συνδυασμό με βιολογικούς στόχους και περιορισμούς αποστολής.
C5 Ανοχή σε αστοχίες	Μια βλάβη μπορεί να διακόψει τη λειτουργία ή να απαιτήσει πλήρη ανθρώπινη επέμβαση.	Υπάρχει monitoring ή alerting, αλλά περιορισμένη ανάκτηση.	Υπάρχει anomaly detection ή redundancy για επιμέρους υποσυστήματα.	Fault-tolerant αρχιτεκτονική με detection, diagnosis, degradation και recovery.
C6 Επεκτασιμότητα	Σταθερή διάταξη χωρίς εύκολη επέκταση.	Μερική αρθρωτότητα σε αισθητήρες ή καλλιεργητικές μονάδες.	Modular επέκταση για ορισμένα subsystems.	Plug-and-play επέκταση sensors, PBR, robots, crops και BLSS nodes.

Πίνακας 4-1 Πλαίσιο κριτηρίων αξιολόγησης με σαφείς βαθμίδες ποιοτικής αξιολόγησης C1–C6
Πλαίσιο κριτηρίων αξιολόγησης με σαφείς βαθμίδες ποιοτικής αξιολόγησης C1–C6

4.1.1 Evidence matrix: αντιστοίχιση συστημάτων/τεχνολογιών με το βιβλιογραφικό σώμα

Πριν από τη συγκριτική αξιολόγηση δημιουργείται πίνακας τεκμηρίωσης που αντιστοιχίζει κάθε ομάδα συστημάτων του Κεφαλαίου 4 με τις πηγές του βιβλιογραφικού σώματος. Ο πίνακας λειτουργεί ως evidence matrix: δείχνει ποια άρθρα χρησιμοποιούνται για κάθε συγκριτική ενότητα και, ταυτόχρονα, περιορίζει την ανάλυση σε όσα πράγματι τεκμηριώνονται από τη συστηματική ανασκόπηση. Έτσι αποφεύγεται η εισαγωγή εξωτερικών παραδειγμάτων ή τεχνικών προδιαγραφών που δεν έχουν τεκμηριωθεί στο υλικό της εργασίας.

Ενότητα	Κατηγορία	Συστήματα/Τεχνολογίες	Ρόλος στη συγκριτική μελέτη	Αναφορά
4.2	Διαστημικά συστήματα καλλιέργειας ISS/LEO	Lada/Svet ως ιστορικά συστήματα, VEGGIE, ISS plant chambers, ISS-compatible microalgae/PBR experiments	Σταδιακή μετάβαση από χειροκίνητη καλλιέργεια σε αυτοματοποιημένη μέτρηση· η πλήρης αυτονομία παραμένει περιορισμένη.	[24], [45], [47], [111], [119]
4.3	Αναλογικές αποστολές και επίγεια δοκιμαστήρια	EDEN ISS, SAM, HI-SEAS, κλινιστάτες/partial-gravity platforms	Ισχυρή επιχειρησιακή αξία για isolation/monitoring, αλλά περιορισμένη αυτόνομη λήψη αποφάσεων.	[39], [89], [90], [9], [120]
4.4	BLSS και φωτοβιοαντιδραστήρες	MELiSSA, Limnospira/Arthrospira PBR, Chlorella PBR, bio-ISRU cyanobacteria	Υψηλή βιολογική σημασία και δυνατότητα κλειστού κύκλου· αδύναμη ενιαία αυτονομία και επεκτασιμότητα.	[25], [26], [23], [76], [112], [48]
4.5	AI/IoST/Digital Twin	IoST cloud architecture, CubeSat cloud processing, hyperspectral sensing, anomaly detection, digital twin lettuce, autonomous hydroponics/fogponics	Το ψηφιακό επίπεδο ωριμάζει κυρίως στη Γη· λείπει επικύρωση σε ακτινοβολία, microgravity και time-delay.	[89], [91], [92], [93], [101]
4.6–4.8	Σύνθεση κενών και μετάβαση στο SPA	Αυτονομία, sensing αξιοπιστίας, BLSS integration, robotics, digital twin, resilience layers	Το κρίσιμο κενό δεν είναι μεμονωμένη τεχνολογία αλλά ολοκλήρωση σε αρχιτεκτονική αυτόνομης λειτουργίας.	[24], [60], [71], [110], [118]

Πίνακας 4-2 Evidence matrix του Κεφαλαίου 4

4.2 Συγκριτική ανάλυση διαστημικών συστημάτων καλλιέργειας

Η πρώτη ομάδα συστημάτων αφορά καλλιέργειες σε περιβάλλον ISS/LEO και τα ιστορικά φυτοδοχεία που άνοιξαν τον δρόμο για τη διαστημική γεωργία. Το βιβλιογραφικό σώμα δεν παρέχει

για κάθε σύστημα ξεχωριστή τεχνική μονογραφία· παρέχει όμως επαρκή ανασκοπική τεκμηρίωση για τη μετάβαση από τα παλαιότερα χειροκίνητα συστήματα σε νεότερες πλατφόρμες με αυξημένη παρακολούθηση, αισθητήρες και αυτοματοποίηση.

Η βασική διάκριση για την παρούσα εργασία είναι ότι η αυτοματοποίηση δεν ταυτίζεται με αυτονομία. Ένα σύστημα μπορεί να καταγράφει περιβαλλοντικές μεταβλητές ή να ελέγχει φωτισμό και άρδευση χωρίς να μπορεί να αποφασίζει σε περίπτωση νέας αστοχίας, βιολογικού stress ή καθυστέρησης επικοινωνίας. Αυτή η διάκριση είναι κρίσιμη, διότι τα συστήματα ISS έχουν σχεδιαστεί κυρίως ως πειραματικές πλατφόρμες υψηλής αξιοπιστίας με ανθρώπινη ή επίγεια εποπτεία, όχι ως πλήρως αυτόνομα αγρο-βιολογικά συστήματα για πολυετείς αποστολές Σελήνης/Άρη.

Σύστημα/Κατηγορία	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Αναφορά
Ιστορικά LEO plant chambers (Lada/Svet ως legacy κατηγορία)	2	2	2	4	2	1	[45], [111]
VEGGIE / ISS-compatible plant & algal use	3	3	3	5	3	3	[24], [45], [119]
Σύγχρονα ISS plant chambers / APH-like automated growth chambers	5	6	4	6	5	4	[24], [45], [118]
ISS photobioreactor trajectory (Limnospira/Arthrospira)	5	6	5	6	5	5	[47], [49], [112]

Πίνακας 4-3 Συγκριτική αξιολόγηση διαστημικών συστημάτων καλλιέργειας ως προφίλ C1–C6

Η ανάγνωση του Πίνακα 4-3 δείχνει ότι τα συστήματα σε τροχιά έχουν αυξηθεί σε πολυπλοκότητα, αλλά το χάσμα μεταξύ μέτρησης και αυτόνομης επιχειρησιακής απόφασης παραμένει. Οι νεότερες κατηγορίες plant chambers και PBR πειραμάτων εμφανίζουν υψηλότερη ωριμότητα σε αισθητήρες και ενεργειακή διαχείριση από τα ιστορικά συστήματα, όμως δεν τεκμηριώνουν πλήρη onboard fault-tolerant λήψη αποφάσεων. Η απαίτηση του SPA, επομένως, δεν είναι απλώς μεγαλύτερο ή πιο

αποδοτικό plant chamber, αλλά αρχιτεκτονική απόφασης που να ενώνει αισθητήρες, βιολογικά μοντέλα, edge processing και fallback.

Η χαμηλότερη βαθμολόγηση των legacy συστημάτων δεν μειώνει την ιστορική τους αξία. Αντίθετα, δείχνει ότι άλλο είναι το κριτήριο επιτυχίας ενός πειράματος φυτικής ανάπτυξης σε χαμηλή γήινη τροχιά και άλλο το κριτήριο επιτυχίας μιας μελλοντικής μονάδας διαστημικής γεωργίας ακριβείας. Στην πρώτη περίπτωση αρκεί να διατηρηθεί και να παρατηρηθεί η καλλιέργεια· στη δεύτερη απαιτείται αυτόνομη διάγνωση, πρόβλεψη, διορθωτική δράση και ασφαλής υποβάθμιση λειτουργίας σε περίπτωση αστοχίας.

4.3 Συγκριτική ανάλυση αναλογικών αποστολών και επίγειων δοκιμών

Οι αναλογικές αποστολές δεν αντικαθιστούν τα πειράματα σε μικροβαρύτητα· παρέχουν όμως κρίσιμη επιχειρησιακή πληροφορία για isolation, maintenance, ανθρώπινο φόρτο και ανθεκτικότητα υποσυστημάτων σε ακραία ή περιορισμένα περιβάλλοντα. Στο βιβλιογραφικό σώμα η ισχυρότερη τεχνολογική τεκμηρίωση προέρχεται από το EDEN ISS, το οποίο εστιάζει σε plant health monitoring σε θερμοκήπιο Ανταρκτικής, ενώ το SAM και το HI-SEAS συνεισφέρουν κυρίως σε αναλογικά δεδομένα habitat, απομόνωσης και μικροβιώματος.

Η σημασία του EDEN ISS για το SPA δεν έγκειται μόνο στην παραγωγή φυτικής βιομάζας αλλά στο γεγονός ότι μεταφέρει τη συζήτηση από απλό περιβαλλοντικό έλεγχο σε plant-health sensing. Η πολυφασματική και θερμική παρακολούθηση μπορεί να ενισχύσει την έγκαιρη ανίχνευση stress, όμως η μετάβαση από ανίχνευση σε αυτόνομη διορθωτική δράση παραμένει ανοικτή.

Σύστημα	Πλαίσιο	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Αναφορά
EDEN ISS	Ανταρκτική / Neumayer III	5	6	4	6	4	5	[89], [9]
SAM	Biosphere 2 / Moon-Mars αναλογικό οικότυπο	4	5	4	4	4	5	[39]
HI-SEAS IV	Αναλογική απομόνωση πληρώματος	2	3	2	3	3	2	[120]

Cloud-enabled clinostat / partial gravity platforms	Επίγεια προσομοίωση μερικής βαρύτητας	4	5	2	4	3	5	[90]S28
---	---------------------------------------	---	---	---	---	---	---	---------

Πίνακας 4-4 Συγκριτική αξιολόγηση αναλογικών αποστολών και επίγειων δοκιμαστηρίων

Το συμπέρασμα από την αναλογική κατηγορία είναι ότι η επίγεια επικύρωση έχει προχωρήσει περισσότερο στο κομμάτι των αισθητήρων και στην επιχειρησιακή λειτουργία από ό, τι στην πλήρη αυτονομία. Η δυνατότητα παρακολούθησης φυτικής υγείας υπάρχει, αλλά δεν συνδυάζεται ακόμη με τεκμηριωμένο closed-loop AI control και fault recovery. Αυτό καθιστά τις αναλογικές αποστολές αναγκαίο, αλλά όχι επαρκές, βήμα προς το SPA.

Για να χρησιμοποιηθούν σωστά οι αναλογικές εγκαταστάσεις ως γέφυρα προς το SPA, πρέπει να διακριθούν τρία επίπεδα επικύρωσης. Πρώτον, η αναλογική επικύρωση περιβάλλοντος δείχνει αν ένα θερμοκήπιο λειτουργεί σε απομόνωση, χαμηλή θερμοκρασία ή περιορισμένη υποστήριξη. Δεύτερον, η Software-in-the-Loop (SiL) επικύρωση επιτρέπει να δοκιμαστούν αλγόριθμοι απόφασης πάνω σε προσομοιωμένα ή ιστορικά δεδομένα. Τρίτον, η Hardware-in-the-Loop (HiL) επικύρωση συνδέει τον αλγόριθμο με πραγματικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές, ώστε να αξιολογηθεί η απόκριση του συστήματος πριν από διαστημική δοκιμή. Αυτά τα στάδια δεν εμφανίζονται ακόμη ως ενιαίο πρωτόκολλο στο βιβλιογραφικό σώμα, αλλά αποτελούν λογική απαίτηση σχεδιασμού για τα επόμενα κεφάλαια. Οι έννοιες αυτές επανέρχονται στα Κεφάλαια 5–6 ως στάδια επικύρωσης της προτεινόμενης IoST-SPA αρχιτεκτονικής πριν από οποιαδήποτε διαστημική δοκιμή.

4.4 Συγκριτική ανάλυση βιοαναγεννητικών συστημάτων και φωτοβιοαντιδραστήρων

Τα BLSS και οι φωτοβιοαντιδραστήρες αποτελούν τον βιολογικό πυρήνα της αυτάρκειας, επειδή μετατρέπουν το πρόβλημα της μεταφοράς πόρων σε πρόβλημα ανακύκλωσης μάζας. Στο βιβλιογραφικό σώμα, το MELiSSA εμφανίζεται ως το πιο συστηματικά τεκμηριωμένο BLSS πλαίσιο, με διαμερίσματα για νιτροποίηση, φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς, ανώτερα φυτά και ανακύκλωση θρεπτικών.

Παρά τη βιολογική ωριμότητα του MELiSSA, η ενσωμάτωση με ECLSS και η αυτόνομη ρύθμιση διαμερισμάτων παραμένουν κρίσιμα ζητήματα. Τα βιολογικά συστήματα δεν μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται όπως τα φυσικοχημικά

υποσυστήματα, άρα απαιτούν συνεχή παρακολούθηση, πρόβλεψη και στρατηγική ολοκλήρωση με το συνολικό life support

Σύστημα/Κατηγορία	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Αναφορά
MELiSSA / integrated BLSS loop	6	7	8	6	5	5	[25], [71], [110]
Limnospira/Arthrospira PBR για air revitalization	5	6	6	6	5	5	[47], [48], [76], [100]
Chlorella vulgaris PBR για Moon base	4	5	5	6	4	5	[26], [60], [110], [112]
Cyanobacteria bio-ISRU για Άρη	4	5	7	5	5	6	[23], [73], [82], [121]
Ιστορικά/κλειστά οικοσυστήματα (BIOS-3/Lunar Palace ως review category)	4	4	7	5	4	3	[111], [117], [122]

Πίνακας 4-5 Συγκριτική αξιολόγηση BLSS/PBR συστημάτων ως προφίλ C1–C6

Σημείωση επί του C3: Η υψηλή τιμή της βιολογικής ISRU στο κριτήριο «Κλειστός βρόχος» δεν δηλώνει απόλυτη απομόνωση του συστήματος από το εξωτερικό περιβάλλον. Δηλώνει λειτουργική αυτάρκεια: η εισροή τοπικών πόρων, όπως αεϊκό CO₂ ή ρεγόλιθος, επιτρέπει την αναπλήρωση απωλειών μάζας και τη μείωση της εξάρτησης από γήινο ανεφοδιασμό. Με αυτή την έννοια, η ISRU μετατρέπει το τοπικό εξωγήινο περιβάλλον σε μέρος του επιχειρησιακού κύκλου υποστήριξης ζωής.

Το κρίσιμο εύρημα του Πίνακα 4.5 είναι η ένταση μεταξύ κλειστότητας και επεκτασιμότητας. Όσο ένα σύστημα πλησιάζει σε πραγματικό BLSS, τόσο αυξάνεται η βιολογική πολυπλοκότητα και μειώνεται η ευκολία αρθρωτής επέκτασης. Αντίστροφα, οι μεμονωμένοι φωτοβιοαντιδραστήρες είναι πιο επεκτάσιμοι, αλλά δεν αποτελούν από μόνοι τους πλήρες κλειστό κύκλωμα. Η πρόκληση του SPA είναι να σχεδιάσει αρχιτεκτονική που να επιτρέπει σταδιακή κλιμάκωση χωρίς απώλεια ελέγχου κύκλων μάζας.

Η βαθμολογία του MELiSSA στην ανοχή σε αστοχίες δεν πρέπει να διαβαστεί ως απόδειξη πλήρους fault tolerance. Αντίθετα, αποτυπώνει ότι το πρόγραμμα διαθέτει δομημένη βιολογική αρχιτεκτονική και εκτενή πειραματική τεκμηρίωση, αλλά η απώλεια ή αστάθεια

ενός διαμερίσματος μπορεί να επηρεάσει τον συνολικό κύκλο. Το κενό δεν είναι μόνο βιολογικό· είναι αρχιτεκτονικό. Χρειάζεται στρώμα παρακολούθησης, diagnosis, fallback και προσωρινής υποκατάστασης λειτουργιών από φυσικοχημικά ECLSS, ώστε η βιολογική πολυπλοκότητα να μη μετατρέπεται σε συστημική ευπάθεια.

4.5 Συγκριτική ανάλυση AI, IoST, sensing και digital twin αρχιτεκτονικών

Ο Άξονας Α2 του βιβλιογραφικού σώματος τεκμηριώνει ότι οι τεχνολογίες AI/IoST μπαίνουν πλέον οργανικά στη διαστημική γεωργία. Οι Priyadarshini κ.ά. προτείνουν αρχιτεκτονική Internet of Space Things, οι Janairo κ.ά. αναπτύσσουν cloud framework για space farming data analysis με CubeSat λογική, οι Qin κ.ά. παρουσιάζουν hyperspectral monitoring για φυτική υγεία, ενώ οι Rewicki κ.ά. εστιάζουν σε unsupervised anomaly discovery σε BLSS τηλεμετρία [89], [92], [93], [97].

Παράλληλα, η βιβλιογραφία δείχνει ότι πολλά AI/IoT συστήματα παραμένουν γήινα ή αναλογικά. Το digital twin για ανάπτυξη μαρουλιού αφορά κλιματικά σενάρια στη Γη και όχι ειδικά space CEA, ενώ τα αυτόνομα hydroponic/fogponic συστήματα παρέχουν χρήσιμη αρχιτεκτονική βάση αλλά απαιτούν space qualification για ακτινοβολία, μηχανικές δονήσεις, θερμικά φορτία και καθυστερήσεις.

Αρχιτεκτονική	Κύρια εφαρμογή	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Αναφορά
IoST cloud architecture	Αρχιτεκτονική διασύνδεσης διαστήματος-νέφους / δικτύου	4	3	2	4	3	6	[92]
CubeSat/cloud space farming data analysis	Ανάλυση δεδομένων κατά την πτήση/ Ροή επεξεργασίας δεδομένων συμβατή με CubeSat	4	4	2	4	3	6	[93]
Autonomous/scalable hydroponics	Υδροπονική πλατφόρμα χαμηλού κόστους βασισμένη στο IoT	5	5	3	5	4	7	[91]

Fogponics + AI / neuro-fuzzy sensing	AI-based sensing/control σε ομιχλοπονία και Προσομοίωση συνθηκών μερικής βαρύτητας	5	5	3	5	4	6	[95], [103]
Hyperspectral / non-destructive sensing	Παρακολούθηση φυτικού στρες και μεταβολιτών	3	7	2	4	3	4	[97], [99]
Digital twin lettuce growth	Digital twin για πρόβλεψη ανάπτυξης μαρουλιού σε κλιματικές ζώνες	4	5	3	5	4	5	S36
BLSS telemetry anomaly detection	Μη επιβλεπόμενη ανίχνευση ανωμαλιών σε χρονοσειρές BLSS	5	6	5	5	6	5	S25
Online flow cytometry / ADA PBR analytics	Παρακολούθηση διεργασιών σε επίπεδο κυττάρου	4	7	4	5	5	5	S40, S41

Πίνακας 4-6 Σύγκριση AI/IoST/Digital Twin αρχιτεκτονικών ως προς C1–C6

Η συγκριτική εικόνα του Πίνακα 4.6 δείχνει ότι καμία μεμονωμένη AI/IoST τεχνολογία δεν επαρκεί για SPA. Τα συστήματα αισθητήρων προσφέρουν πλούσια δεδομένα, τα cloud/CubeSat frameworks προσφέρουν διασύνδεση και επεξεργασία, τα anomaly-detection εργαλεία προσφέρουν early warning, και τα digital twins προσφέρουν predictive modelling. Το κενό είναι η ενιαία σύνθεση αυτών σε αρχιτεκτονική όπου κάθε επίπεδο γνωρίζει πότε πρέπει να δράσει, πότε να υποβαθμίσει τη λειτουργία και πότε να ζητήσει ανθρώπινη επιβεβαίωση. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτεί η διάκριση ανάμεσα σε στατιστική ανίχνευση και επιχειρησιακή διάγνωση. Ένα anomaly detection μοντέλο μπορεί να εντοπίσει απόκλιση σε τηλεμετρία, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι γνωρίζει αν η αιτία είναι βλάβη αισθητήρα, θεραπευτικό stress, μικροβιακή μεταβολή ή φυσιολογική προσαρμογή καλλιέργειας. Για αυτό το SPA δεν μπορεί να βασίζεται μόνο σε AI accuracy. Χρειάζεται συνδυασμό sensor health, βιολογικών κανόνων, ψηφιακού διδύμου, human-in-the-loop επιβεβαίωσης και κλιμακωτών επιπέδων αυτονομίας.

4.6 Σύνθεση ευρημάτων: τι είναι ώριμο, τι είναι ημιώριμο και τι λείπει

Η συνολική εικόνα του βιβλιογραφικού σώματος είναι άνιση. Ωριμες είναι οι επιμέρους τεχνολογίες καλλιέργειας ελεγχόμενου περιβάλλοντος, όπως υδροπονία, LED φωτισμός, βασικός περιβαλλοντικός έλεγχος και εργαστηριακοί φωτοβιοαντιδραστήρες. Ημιώριμες

είναι οι τεχνολογίες plant-health sensing, cloud/edge data analysis, anomaly detection και digital-twin modelling. Χαμηλότερης ωριμότητας παραμένουν οι κατηγορίες που έχουν τη μεγαλύτερη σημασία για μακροχρόνιες αποστολές: radiation-hardened IoST stack, fault-tolerant autonomous control, κλιμακώσιμο BLSS/ECLSS integration και space-specific digital twin.

Η σύγκριση αυτή μετατοπίζει την εστίαση από την απλή ύπαρξη καλλιεργητικών υποσυστημάτων στη λειτουργική τους διασύνδεση. Τα υφιστάμενα συστήματα παρέχουν επιμέρους ικανότητες, αλλά δεν συγκροτούν ακόμη ενιαία αρχιτεκτονική που να μετατρέπει αξιόπιστα τις μετρήσεις σε ελεγχόμενες, ασφαλείς και αναστρέψιμες αποφάσεις.

Ωριμότητα	Κατηγορία	Τι υπάρχει	Τι λείπει	Sources
Ωριμο	LED/υδροπονία/βασικός CEA έλεγχος	Υπάρχει τεχνική βάση και επίγεια εμπειρία.	Μεταφορά σε συνθήκες μικροβαρύτητας/ακτινοβολίας και ενσωμάτωση με BLSS..	[24], [45], [109]
Ωριμο προς ημιώριμο	PBR και μικροάλγες για air revitalization	Υπάρχουν μοντέλα, ISS-related πειράματα και βιολογική τεκμηρίωση.	Κλιμάκωση, βιοεπίστρωση, συγκομιδή και ενσωμάτωση στη διατροφή του πληρώματος.	[26], [47], [76]S10, S11, S12
Ημιώριμο	Plant-health sensing / hyperspectral / FCM	Ισχυρή δυνατότητα ανίχνευσης stress και κυτταρικής κατάστασης.	Σύνδεση με autonomous actuation και XAI.	[9], [97], [105]
Ημιώριμο	IoST / CubeSat / cloud-edge pipelines	Υπάρχουν αρχιτεκτονικές επικοινωνίας και υπολογιστικής επεξεργασίας.	Διαστημική πιστοποίηση, αυτονομία με επίγνωση καθυστέρησης και ανθεκτικό στην ακτινοβολία υλικό.	[90], [92], [93]
Αναδυόμενο	Digital twin / anomaly detection	Υπάρχει predictive και anomaly-detection βάση.	Space-specific calibration, fault-tolerance και integration με BLSS.	[89], [101]

Χαμηλό TRL	Radiation-hardened autonomous SPA architecture	Το βιβλιογραφικό σώμα τεκμηριώνει την ανάγκη, όχι ολοκληρωμένη λύση.	Ενιαία πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική με ανθεκτικότητα, μηχανισμούς εφεδρικής λειτουργίας και ιεραρχία λήψης αποφάσεων.	[60], [71], [110]
------------	--	--	--	-------------------

Πίνακας 4-7 Συνολική σύνθεση ωριμότητας τεχνολογιών

4.7 Περιορισμοί της συγκριτικής μελέτης

Η παρούσα συγκριτική μελέτη έχει τέσσερις περιορισμούς που πρέπει να δηλωθούν ρητά. Πρώτον, το βιβλιογραφικό σώμα είναι ετερογενές: περιλαμβάνει review papers, εργαστηριακά πειράματα, αναλογικές εγκαταστάσεις, μοντέλα, πρωτότυπα IoT και βιολογικές μελέτες. Δεύτερον, οι βαθμολογίες C1–C6 δεν αποτελούν μετρήσεις κοινής πειραματικής καμπάνιας, αλλά ποιοτική κανονικοποίηση βάσει διαθέσιμων δημοσιευμένων στοιχείων. Τρίτον, ορισμένα ιστορικά συστήματα εμφανίζονται μέσω ανασκοπήσεων και όχι μέσω πρωτογενών τεχνικών εγγραφών· για αυτό βαθμολογούνται συντηρητικά. Τέταρτον, η προτεινόμενη SPA αρχιτεκτονική δεν συγκρίνεται ως ισότιμο υλοποιημένο σύστημα με τα υπάρχοντα συστήματα, αλλά παρουσιάζεται παρακάτω ως σύνολο σχεδιαστικών απαιτήσεων που προκύπτει από τα κενά της σύγκρισης.

4.8 Από τη σύγκριση στις σχεδιαστικές απαιτήσεις του ζητούμενου SPA

Επειδή το ζητούμενο SPA αποτελεί εννοιολογική αρχιτεκτονική και όχι υλοποιημένο σύστημα, δεν πρέπει να τοποθετείται στους ίδιους συγκριτικούς πίνακες με τα πραγματικά ή πειραματικά συστήματα. Η σωστή του θέση είναι μετά τη συγκριτική ανάλυση, ως σύνθεση σχεδιαστικών απαιτήσεων. Με αυτόν τον τρόπο δεν δημιουργείται η εντύπωση ότι μια μη υλοποιημένη πρόταση υπερτερεί υφιστάμενων πλατφόρμων αντίθετα, τεκμηριώνεται ότι τα χαμηλά ή ασύμμετρα προφίλ των πραγματικών συστημάτων οδηγούν σε συγκεκριμένες απαιτήσεις για το Κεφάλαιο 5.

Κριτήριο	Αδυναμία που παρατηρείται στα υπάρχοντα συστήματα	Απαίτηση Target SPA	Μετάβαση το Κεφάλαιο 5
C1 Αυτονομία	Τα περισσότερα συστήματα εξακολουθούν να βασίζονται σε ανθρώπινη παρέμβαση ή σε έλεγχο από το επίγειο κέντρο.	Ενσωμάτωση onboard επιπέδου λήψης αποφάσεων με AI, κανόνες ασφάλειας, confidence score και δρομολόγηση αποφάσεων L1–L4.	AI Decision-Making / Autonomy Layer

C2 Sensing	Τα sensing συστήματα είναι ισχυρά αλλά αποσπασματικά.	Ενιαίο sensor fusion για μικροκλίμα, θρεπτικά στοιχεία, εικόνα, δεδομένα PBR και αξιολόγηση υγείας αισθητήρων.	Sensing & Actuation Layer
C3 Κλειστός βρόχος	Τα BLSS έχουν βιολογική αξία αλλά όχι πλήρη IoST/ECLSS διασύνδεση.	BLSS Integration Interface για CO ₂ /O ₂ , νερό, θρεπτικά, βιομάζα και απόβλητα.	BLSS Integration Interface
C4 Ενέργεια	Η ενεργειακή απόδοση εξετάζεται συχνά σε υποσύστημα και όχι σε συνολικό control objective.	Energy-aware optimization που συνδέει φωτισμό, PBR, παραγωγικότητα και επιχειρησιακούς περιορισμούς αποστολής.	Edge Computing / Digital Twin Layer
C5 Fault tolerance	Υπάρχουν alerting/anomaly εργαλεία, όχι πλήρης recovery hierarchy.	Resilience layer με anomaly detection, diagnosis, graceful degradation και fallback policies.	Εγκάρσιο Resilience Layer
C6 Επεκτασιμότητα	Τα κλειστά συστήματα είναι δύσκαμπτα, ενώ τα modular συστήματα δεν είναι πλήρη BLSS.	Layered modular architecture για αισθητήρες, PBR, υδροπονία, robotics και digital-twin nodes.	Συνολική IoST-SPA Αρχιτεκτονική

Πίνακας 4-8 Σχεδιαστικές απαιτήσεις ζητούμενου SPA που προκύπτουν από τη συγκριτική αξιολόγηση

4.9 Τεχνολογικά κενά G1–G6 και σύνδεση με τα Κεφάλαια 5–6

Η σύνθεση των Πινάκων 4.3–4.8 οδηγεί σε έξι τεχνολογικά κενά. Τα κενά αυτά δεν είναι απλές ελλείψεις εξαρτημάτων, αλλά αρχιτεκτονικές ασυνέχειες μεταξύ βιολογικού συστήματος, sensing, υπολογιστικής επεξεργασίας, απόφασης και ενεργοποίησης.

#	Τεχνολογικό κενό	Τεκμηρίωση από τη σύγκριση	Απαίτηση για SPA
G1	Απουσία autonomous onboard decision-making για time-delay	Τα ISS/analog συστήματα παραμένουν ground-in-loop ή human-in-the-loop.	AI decision layer με πολιτικές ασφάλειας και fallback.

G2	Ανεπαρκής radiation-hardened IoST/CEA sensing stack	Τα IoST πρωτότυπα και αισθητήρια συστήματα δεν είναι επικυρωμένα για μακροχρόνια ακτινοβολία.	Sensing/networking layer με αξιοπιστία και validation.
G3	Ανεπαρκής BLSS/ECLSS/IoST ολοκλήρωση	Το MELiSSA και οι PBR έχουν βιολογική ισχύ αλλά όχι πλήρη autonomous control integration.	BLSS integration layer και mass-flow supervision.
G4	Περιορισμένη αυτόνομη ρομποτική και crew-time reduction	Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ανάγκη large-scale crop production με automation/robotics.	Robotic cultivation cycle και task allocation.
G5	Απουσία space-specific digital twin με fault tolerance	Το digital twin υπάρχει κυρίως ως γήινο/CEA concept και όχι ως διαστημικό resilience model.	Digital twin + anomaly detection + what-if simulation.
G6	Απουσία ενιαίου SPA conceptual model με επίπεδα αυτονομίας	Δεν εντοπίζεται πλήρης layered architecture που να ενώνει BLSS, IoST, AI, resilience και operations.	Ολοκληρωμένο SPA framework με decision hierarchy.

Πίνακας 4-9 Τεχνολογικά κενά G1–G6 και τεκμηρίωση από το βιβλιογραφικό σώμα

Τα κενά G1–G6 λειτουργούν ως γέφυρα προς τα επόμενα κεφάλαια: μεταφράζουν τη συγκριτική αποτίμηση σε συγκεκριμένες σχεδιαστικές απαιτήσεις για αισθητήρες, δικτύωση, υπολογισμό άκρου, ψηφιακό δίδυμο, ανθεκτικότητα και BLSS/IoST ολοκλήρωση.

5 IoST-SPA Αρχιτεκτονική για Διαστημική Γεωργία Ακριβείας

Το παρόν κεφάλαιο μετατρέπει τα τεχνολογικά κενά που εντοπίστηκαν στο Κεφάλαιο 4 σε τεκμηριωμένες αρχιτεκτονικές απαιτήσεις για ένα προτεινόμενο πλαίσιο Space Precision Agriculture (SPA). Η αρχιτεκτονική δεν παρουσιάζεται ως πειραματικά επικυρωμένο σύστημα, αλλά ως σύνθεση τεχνολογικών στοιχείων που έχουν ήδη εμφανιστεί, δοκιμαστεί ή αξιολογηθεί αποσπασματικά στο βιβλιογραφικό σώμα των 127 συμπεριληφθεισών δημοσιεύσεων. Η συνεισφορά του κεφαλαίου είναι η ενοποίηση αυτών των στοιχείων σε μια ενιαία, onboard-first αρχιτεκτονική δεδομένων, απόφασης και ελέγχου.

Η βασική θέση είναι ότι η προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική δεν ξεκινά από το μηδέν. Οι φυτοθάλαμοι ISS και τα αναλογικά συστήματα δείχνουν την αξία του ελεγχόμενου μικροκλίματος και της οπτικής παρακολούθησης. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες *Limnospira* και *Chlorella* τεκμηριώνουν ροές O₂/CO₂, βιομάζας και θρεπτικών για BLSS. Οι μελέτες IoST, cloud, CubeSat και task offloading δείχνουν τρόπους δικτύωσης και υπολογιστικής κατανομής. Οι εφαρμογές AI, anomaly detection και digital twin παρέχουν τεχνικές για διάγνωση, πρόβλεψη και expected-state control.

5.1 Από το βιβλιογραφικό σώμα στις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις

Η αναθεωρημένη αρχιτεκτονική ακολουθεί μια αυστηρή αλυσίδα τεκμηρίωσης: πρώτα εντοπίζεται τι έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στις μελέτες, έπειτα καταγράφεται ο περιορισμός αυτής της χρήσης, και τέλος ορίζεται πώς το στοιχείο ενσωματώνεται στο SPA. Με αυτόν τον τρόπο, το Κεφάλαιο 5 δεν λειτουργεί ως ελεύθερη τεχνική πρόταση, αλλά ως τεκμηριωμένη αρχιτεκτονική σύνθεση βάσει του βιβλιογραφικού σώματος.

Κενό	Αρχιτεκτονική απαίτηση	Επίπεδο SPA	Τεκμηρίωση
G1: απουσία onboard λήψης αποφάσεων	Τοπική απόφαση χωρίς άμεση επίγεια εντολή, με κλιμάκωση προς πλήρωμα μόνο όταν μειώνεται η εμπιστοσύνη.	AI Decision Layer + Confidence Score	ISS και αναλογικά συστήματα παραμένουν σε μεγάλο βαθμό crew/ground dependent [24], [97]

G2: αναξιόπιστη sensing/IoST υποδομή	Sensor fusion, έλεγχος αξιοπιστίας, outlier detection, βιολογική και οπτική παρακολούθηση.	Sensing + Data Fusion + Resilience	ADA, FCM, hyperspectral και IoT συστήματα παρέχουν επιμέρους τεχνικές [105], [106]
G3: ελλιπής BLSS/IoST ενσωμάτωση	Ψηφιακή μετάφραση ροών CO ₂ , O ₂ , νερού, θρεπτικών και βιομάζας σε ελεγχόμενα IoST signals.	BLSS Integration Interface	MELiSSA, Limnospira και Chlorella δείχνουν τις βιολογικές ροές αλλά όχι ενιαία IoST διαχείριση [25], [26], [112]
G4: χαμηλή αυτονομία ενεργοποιητών/ρομποτικής	Τοπικός έλεγχος ενεργοποιητών με fallback policies και καταγραφή συμβάντων.	Actuation + Resilience	Το αεροπονικό IoT σύστημα Roffi δείχνει πλήρη ροή αισθητήρας-ελεγκτής-ενεργοποιητής σε γήινες συνθήκες [109]
G5: απουσία space-specific digital twin	Υβριδικό expected-state engine που συνδυάζει data-driven προβλέψεις φυτών με μηχανιστικά και μεταβολικά μοντέλα φωτοβιοαντιδραστών.	Edge Computing + Hybrid Digital Twin	Το digital twin μαρουλιού δείχνει data-driven πρόβλεψη βιομάζας, ενώ τα μοντέλα Roughton και Maton παρέχουν μηχανιστική/μεταβολική βάση για PBR και κυανοβακτήρια [29], [87], [101]
G6: απουσία ενιαίας resilience architecture	Ιεραρχία R1-R4 για διόρθωση, απομόνωση, safe mode και emergency operation.	Cross-layer Resilience	Anomaly detection σε BLSS telemetry και outlier removal σε PBR software αποτελούν σημεία εκκίνησης [89], [106]

Πίνακας 5-1 Αντιστοίχιση τεχνολογικών κενών με αρχιτεκτονικές απαιτήσεις και τεκμηρίωση από το βιβλιογραφικό σώμα

5.2 Τεχνικές άγκυρες από το βιβλιογραφικό σώμα

Για να είναι χρήσιμη σε ειδικό αναγνώστη, η αρχιτεκτονική πρέπει να δείχνει όχι μόνο ποια επίπεδα προτείνει, αλλά και σε ποιες μελέτες έχουν ήδη εμφανιστεί αντίστοιχες τεχνικές λύσεις. Ο Πίνακας 5.2 συγκεντρώνει ενδεικτικά τεχνικά στοιχεία που μπορούν να λειτουργήσουν ως σημεία εκκίνησης για τον μηχανολογικό και υπολογιστικό σχεδιασμό του SPA. Οι τιμές δεν μεταφέρονται μηχανικά ως τελικές προδιαγραφές αποστολής· χρησιμοποιούνται ως βιβλιογραφικά τεκμηριωμένες περιοχές αναφοράς.

Πεδίο	Μελέτη / σύστημα	Τεχνική τιμή ή χαρακτηριστικό	Αξιοποίηση στο SPA
PBR monitoring	Al Ketife algal PBR model	pH 6-8, θερμοκρασία 20°C, CO ₂ , φωτεινή ένταση, MC-100SCM, G110, LI-250A	Ενσωμάτωση pH/CO ₂ /φωτός/θερμοκρασίας στο Sensing Layer και στο BLSS Interface

PBR data processing	ADA software	OD, θερμοκρασία, pH, διαλυμένο O ₂ , φωτεινή ένταση. Savitzky-Golay filtering και outlier removal.	Προεπεξεργασία δεδομένων, μείωση θορύβου και αποτροπή λανθασμένων αποφάσεων AI
Cell-level biological monitoring	Automated online FCM	BD Accuri C6 Plus, laser 488 nm, OC-300 sampler, FL1/FL3, FSC/SSC.	Βιολογικό early-warning υποσύστημα για μόλυνση ή αλλαγή πληθυσμιακής σύνθεσης
Optical plant health	Hyperspectral system	Line-scan 400-1000 nm, UV-A, 7 ML algorithms. 94,3% ακρίβεια 4η ημέρα stress, 98,5% 7η ημέρα.	Οπτική διάγνωση stress στο AI reactive layer
Remote sensing microorganisms	Photosynthetic microorganism monitoring	Narrow-band NDVI R745-755/R675-685 για βιομάζα και χλωροφύλλη.	Παρακολούθηση φωτοβιοαντιδραστήρων και μικροβιακών BLSS κόμβων
IoST / cloud architecture	ARCHER 2U CubeSat / cloud framework	ESP-NOW για peer-to-peer, MQTT μέσω AWS IoT Core, WebSocket για real-time χρήση, YOLOv8/EfficientNetB4 για εικόνες.	Networking και edge/cloud pattern, με μετατόπιση στο SPA προς onboard-first λογική
Protocol stack	IoST architecture	TCP/IP stack με HDLC, ATM, DVB στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων.	Αρχιτεκτονικό προηγούμενο για πολυεπίπεδη διαστημική επικοινωνία
Aeroponic IoT control	Indoor aeroponic system	DHT11, BH1750, Wemos D1 mini, υπερηχητικοί νεφελοποιητές, ανεμιστήρες, Peltier, αντλίες, LED, ThingSpeak. Threshold: ενεργοποίηση ψύξης/αντλίας >29°C, απενεργοποίηση <25°C.	Actuation layer και fallback rule-based control για μη κρίσιμες λειτουργίες
Digital twin / prediction	Lettuce digital twin	Random Forest Regression, R ² =0,984-0,986, MAPE περίπου 6%.	Expected-state engine και εκτίμηση απόκλισης
BLSS telemetry anomaly detection	EDEN ISS greenhouse telemetry	Unsupervised discovery/isolation of anomalous behavior σε BLSS telemetry.	Resilience layer R1-R2 και event-driven alerts
Radiation biological tolerance	Arthrospira / Limnospira	Επιβίωση σε γ-ακτινοβολία έως 6.400 Gy.	Βιολογική επιλογή οργανισμών για BLSS, όχι ηλεκτρονική rad-hard προδιαγραφή

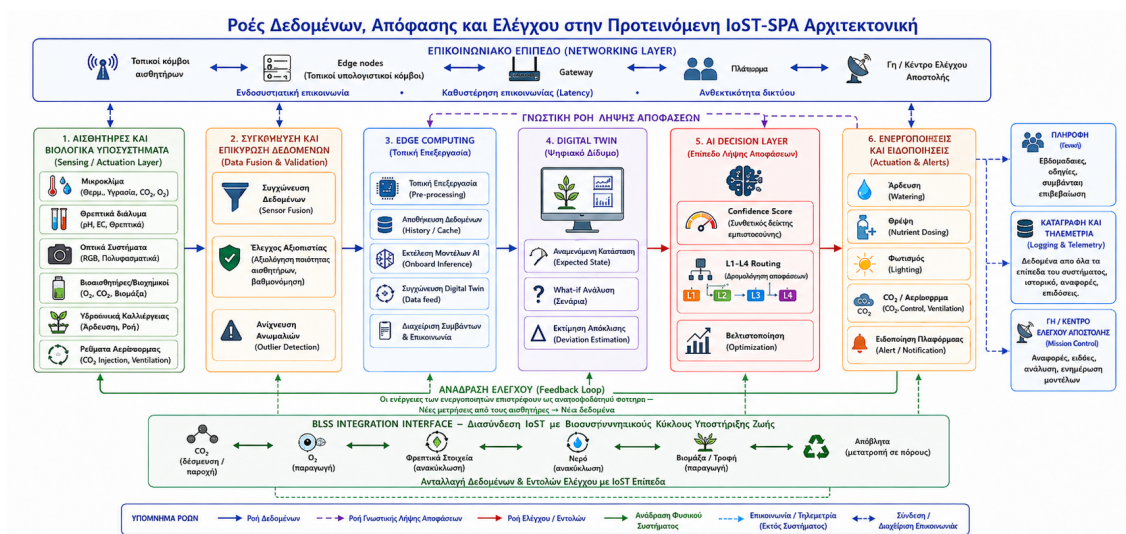
Chlorella PBR productivity	Chlorella vulgaris PBR	Προσαρμογή σε pH/θερμοκρασία/CO ₂ , βιομάζα έως 4 g/L ημερησίως και πρωτεΐνη περίπου 55%.	PBR node για παραγωγή O ₂ /βιομάζας και συμπληρωματική τροφή
Mechanistic PBR digital twin	Poughon Limnospira/ISS model	Μηχανιστικό μοντέλο ανάπτυξης Limnospira με μεταφορά μάζας και ανάγκη επαναβαθμονόμησης σε ακραίο pH και ISS pCO ₂ .	Expected-state engine για O ₂ /CO ₂ /βιομάζα PBR και έλεγχο αποκλίσεων
Metabolic / biological constraints	Maton Arthrospira metabolic modelling	Μεταβολικό δίκτυο και πειραματική επικύρωση για Arthrospira sp. PCC 8005.	Βιολογικοί περιορισμοί και mass-balance constraints μέσα στο Digital Twin

Πίνακας 5-2 Τεχνικές άγκυρες από το βιβλιογραφικό σώμα και αξιοποίησή τους στην προτεινόμενη SPA αρχιτεκτονική

Σημείωση: όπου το βιβλιογραφικό σώμα δεν παρέχει ποσοτική τιμή, το κεφάλαιο δεν εισάγει αυθαίρετη προδιαγραφή. Για παράδειγμα, ηλεκτρονικές απαιτήσεις τύπου TID ή επιλογές τύπου flight-qualified processor πρέπει να καθοριστούν σε μεταγενέστερη φάση μηχανολογικής επικύρωσης και όχι να παρουσιαστούν ως εύρημα του βιβλιογραφικού σώματος.

5.3 Συνολική IoST-SPA αρχιτεκτονική και ροές δεδομένων

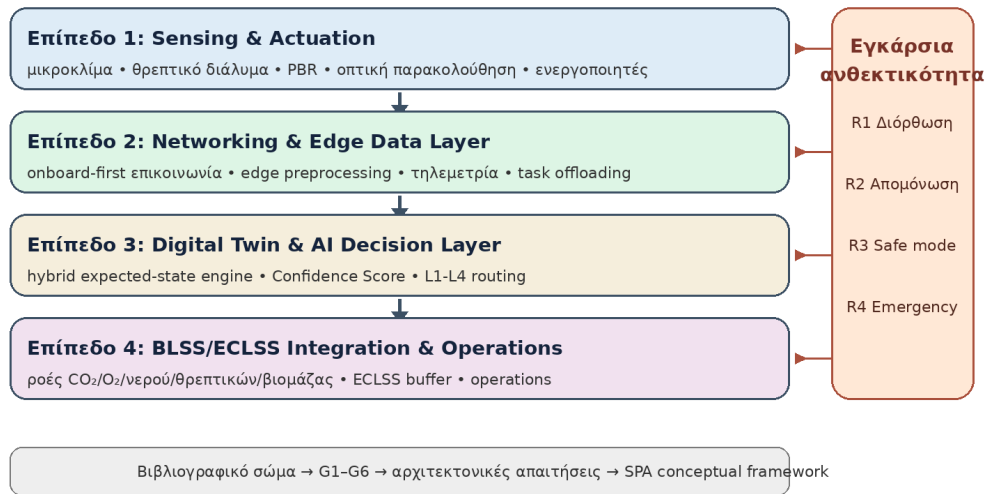
Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική οργανώνεται σε έξι λειτουργικά τμήματα: αισθητήρες και βιολογικά υποσυστήματα, συγχώνευση και επικύρωση δεδομένων, τοπική επεξεργασία, ψηφιακό δίδυμο, επίπεδο λήψης αποφάσεων ΑΙ και ενεργοποιητές/ειδοποιήσεις. Το επικοινωνιακό επίπεδο λειτουργεί εγκάρσια και δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως πηγή δεδομένων, αλλά ως υποδομή αμφίδρομης μετάδοσης μεταξύ αισθητήρων, edge nodes, πληρώματος και κέντρου ελέγχου. Το BLSS Integration Interface λειτουργεί ως ψηφιακό επίπεδο μετάφρασης των βιολογικών κύκλων CO₂, O₂, νερού, θρεπτικών, βιομάζας και αποβλήτων σε δεδομένα και εντολές ελέγχου.



Εικόνα 5-1 Ροές δεδομένων, απόφασης και ελέγχου στην προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική

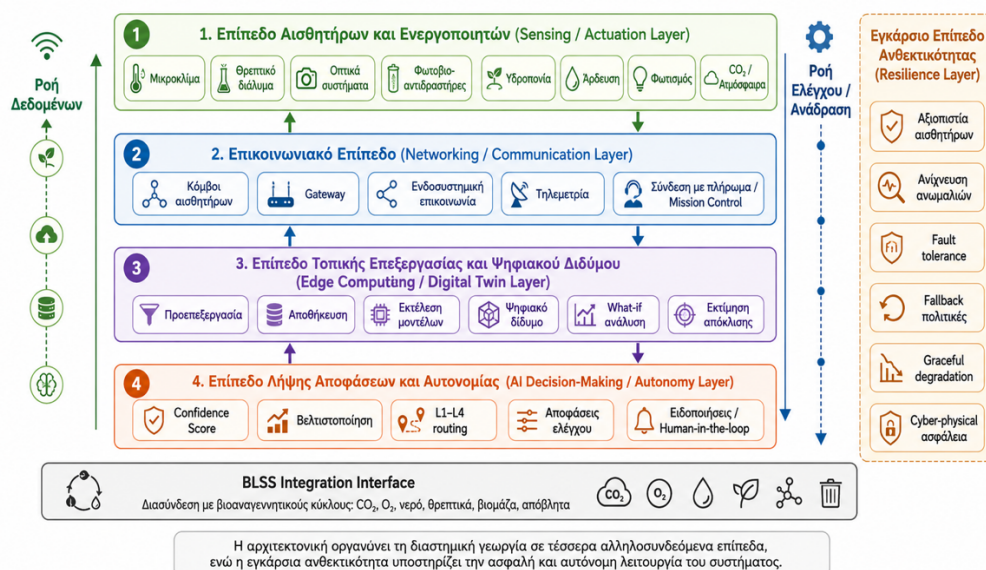
Η κύρια ροή ξεκινά από τους αισθητήρες και τα βιολογικά υποσυστήματα, περνά από στάδια συγχώνευσης και επικύρωσης δεδομένων, τοπικής επεξεργασίας, ψηφιακού διδύμου και επιπέδου λήψης αποφάσεων AI, και καταλήγει σε ενεργοποιητές, ειδοποιήσεις, τηλεμετρία και επικοινωνία με το πλήρωμα ή το Κέντρο Ελέγχου Αποστολής. Η πράσινη ανάδραση ελέγχου σημαίνει ότι οι ενέργειες μεταβάλλουν το φυσικό ή βιολογικό σύστημα και αξιολογούνται μέσω νέων μετρήσεων. Αυτή η κλειστή ροή διαφοροποιεί το SPA από απλές πλατφόρμες παρακολούθησης.

Προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική ως τετραεπίπεδο πλαίσιο



Εικόνα 5-2 Προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική ως τετραεπίπεδο εννοιολογικό πλαίσιο με εγκάρσια ανθεκτικότητα

Το Σχήμα 5.2 συμπληρώνει τις ροές του Σχήματος 5.1, παρουσιάζοντας την ίδια αρχιτεκτονική ως τετραεπίπεδο εννοιολογικό πλαίσιο. Τα τέσσερα λειτουργικά επίπεδα δεν αποτελούν σειριακή αλυσίδα λογισμικού, αλλά αλληλοεξαρτώμενα επίπεδα αισθητήρων/ενεργοποιητών, επικοινωνίας/edge δεδομένων, ψηφιακού διδύμου/λήψης αποφάσεων και BLSS/ECLSS λειτουργίας. Η ανθεκτικότητα R1-R4 τέμνει εγκάρσια όλα τα επίπεδα, επειδή η αστοχία αισθητήρων, δικτύου, μοντέλου ή βιολογικού υποσυστήματος δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί σε ένα μόνο σημείο της αρχιτεκτονικής.



Εικόνα 5-3 Προτεινόμενη IoST-SPA αρχιτεκτονική ως εννοιολογικό πλαίσιο

Στο βιβλιογραφικό σώμα οι αισθητήρες εμφανίζονται σε τρεις οικογένειες εφαρμογών: φυτοθάλαμοι και αναλογικά θερμοκήπια, φωτοβιοαντιδραστήρες και γήινα συστήματα CEA. Οι φυτοθάλαμοι και τα αναλογικά συστήματα δείχνουν την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης μικροκλίματος και φυτικής υγείας. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες απαιτούν pH, θερμοκρασία, CO₂, O₂, φωτεινή ένταση, οπτική πυκνότητα και δείκτες βιομάζας. Τα γήινα IoT/CEA συστήματα αποδεικνύουν ότι ο πλήρης κύκλος αισθητήρα-ελεγκτή-ενεργοποιητή μπορεί να υλοποιηθεί με χαμηλού κόστους εξαρτήματα, αλλά δεν αρκεί για διαστημική επικύρωση.

Συνεπώς, το Sensing and Actuation Layer του SPA δεν προτείνει έναν νέο τύπο αισθητήρα, αλλά ενοποιεί τις κατηγορίες μετρήσεων που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί. Η κύρια διαφοροποίηση είναι ότι κάθε μέτρηση συνοδεύεται από πληροφορία αξιοπιστίας. Η αρχιτεκτονική δεν μεταφέρει την τιμή ενός αισθητήρα απευθείας στο AI Decision Layer, αλλά την περνά από έλεγχο ποιότητας, σύγκριση με γειτονικούς αισθητήρες και αξιολόγηση συμβατότητας με το ψηφιακό δίδυμο.

Κατηγορία	Μετρούμενες/ελεγχόμενες παράμετροι	Πού έχει χρησιμοποιηθεί	Ρόλος στο SPA
Μικροκλίμα	θερμοκρασία, υγρασία, CO ₂ , O ₂ , εθυλένιο	Φυτοθάλαμοι και αναλογικά συστήματα	Σταθεροποίηση περιβάλλοντος και υποστήριξη αποφάσεων φωτισμού/αερισμού

Θρεπτικό διάλυμα	pH, EC, θρεπτικά, θερμοκρασία νερού, DO	Υδροπονικά / αεροπονικά και PBR συστήματα	Έλεγχος θρέψης, ανίχνευση αστάθειας και προσαρμογή δοσολογίας
PBR λειτουργία	pH 6-8, 20°C, CO ₂ , φωτεινή ένταση, OD, O ₂	Algal PBR και ADA	Κόμβος BLSS με συνεχή παρακολούθηση O ₂ /CO ₂ /βιομάζας
Κυτταρική κατάσταση	FL1, FL3, FSC, SSC, συγκέντρωση κυττάρων	Online FCM BD Accuri C6 Plus, 488 nm	Έγκαιρη ανίχνευση μόλυνσης ή αλλαγής πληθυσμού
Οπτική/υπερφασματική απεικόνιση	400-1000 nm, δείκτες R690/R702 και R559/R678	Plant stress monitoring	Μη καταστροφική διάγνωση φυτικού στρες
Ενεργοποιητές	αντλίες, νεφελοποιητές, Peltier, LED, αερισμός	IoT aeroponic system	Ροή ελέγχου και fallback κανόνες για μη κρίσιμες ενέργειες

Πίνακας 5-3 Αισθητηριακές και ενεργοποιητικές κατηγορίες που τεκμηριώνονται στο βιβλιογραφικό σώμα

5.4 Data Fusion and Validation: από ακατέργαστη μέτρηση σε αξιόπιστο σήμα

Το βιβλιογραφικό σώμα δείχνει ότι η ποιότητα δεδομένων είναι εξίσου σημαντική με την ύπαρξη αισθητήρων. Το ADA επεξεργάζεται δεδομένα εμπορικών φωτοβιοαντιδραστήρων εφαρμόζοντας φίλτρα Savitzky-Golay και αφαίρεση ακραίων τιμών, επειδή στιγμιαία σφάλματα εξοπλισμού μπορούν να παραμορφώσουν την ερμηνεία της καλλιέργειας. Αντίστοιχα, η online κυτταρομετρία ροής δεν βασίζεται σε μία μόνο τιμή, αλλά σε πολυπαραμετρικό phenotypic fingerprinting για διαχωρισμό μικροφυκών και προκαρυωτικών οργανισμών.

Το SPA αξιοποιεί αυτά τα παραδείγματα ως αρχιτεκτονικό κανόνα: καμία απόφαση δεν βασίζεται σε ένα μοναδικό ακατέργαστο σήμα. Κάθε είσοδος αποκτά sensor health score, το οποίο προκύπτει από διαθεσιμότητα, χρονική επικαιρότητα, φυσιολογικό εύρος, διασταύρωση με άλλες μετρήσεις και συμφωνία με το ψηφιακό δίδυμο. Η επιλογή αυτή συνδέει το G2 με το G5: η αξιοπιστία αισθητήρων και το expected-state μοντέλο πρέπει να λειτουργούν μαζί.

5.5 Networking Layer: από cloud-first παρακολούθηση σε onboard-first επικοινωνία

Οι μελέτες του βιβλιογραφικού σώματος δεν παρέχουν μία ενιαία, επικυρωμένη στο διάστημα στοίβα δικτύωσης για SPA. Παρέχουν όμως χρήσιμα προηγούμενα. Οι Janairo κ.ά. υλοποιούν space-to-edge-to-cloud λογική με ARCHER 2U CubeSat, χρησιμοποιώντας

ESP-NOW για τοπική peer-to-peer επικοινωνία, MQTT μέσω AWS IoT Core για αποστολή στο σύννεφο και WebSocket για real-time επικοινωνία με τελικούς χρήστες. Οι Priyadarshini κ.ά. προτείνουν πολυεπίπεδη IoST cloud architecture με TCP/IP, HDLC, ATM και DVB στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων. Οι Suganob κ.ά. αναφέρουν ZigBee σε χαμηλής ισχύος υδροπονικά/space farming συστήματα.

Το κρίσιμο συμπέρασμα δεν είναι ότι το SPA πρέπει να υιοθετήσει αυτούσια ένα από αυτά τα πρωτόκολλα. Αντίθετα, το βιβλιογραφικό σώμα δείχνει ότι τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά, χωρίς συστηματικό benchmarking για αποστολές μεγάλης καθυστέρησης. Επομένως, το SPA υιοθετεί την αρχή της onboard-first επικοινωνίας: οι κρίσιμες αποφάσεις λαμβάνονται τοπικά, ενώ η σύνδεση με τη Γη χρησιμοποιείται για τηλεμετρία, ενημέρωση μοντέλων, επιστημονική ανάλυση και μη επείγουσα εποπτεία.

Λειτουργία	Τι χρησιμοποιήθηκε	Τεχνικό χαρακτηριστικό	Μεταφορά στο SPA
Τοπική επικοινωνία κόμβων	ESP-NOW μεταξύ μικροελεγκτών	Χαμηλή καθυστέρηση, χωρίς υποδομή Wi-Fi	Τοπική ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων/edge nodes σε μη κρίσιμα ή εφεδρικά κανάλια
Cloud telemetry	MQTT μέσω AWS IoT Core	Μετάδοση δεδομένων σε cloud περιβάλλον	Χρήσιμο ως γήινο προηγούμενο, αλλά στο SPA μετατρέπεται σε delayed telemetry
Real-time χρήστης	WebSocket έναντι HTTP	Αμφίδρομη συνεχής επικοινωνία, χαμηλότερη καθυστέρηση/εύρος ζώνης	Επικοινωνία πληρώματος ή τοπικού dashboard
Χαμηλής ισχύος ασύρματο	ZigBee	Ασύρματα δίκτυα χαμηλής ισχύος σε αυτόματα υδροπονικά/fogponics συστήματα	Δευτερεύον κανάλι για μη κρίσιμη παρακολούθηση
Διαστημική στοίβα IoST	TCP/IP, HDLC, ATM, DVB	Πολυεπίπεδη IoST cloud architecture	Αρχιτεκτονικό προηγούμενο, όχι τελική πιστοποιημένη λύση SPA
Κατανομή φόρτου	MARL task offloading	Απόφαση τοπικής επεξεργασίας ή μεταφοράς σε γειτονικό κόμβο	Μελλοντικό μοντέλο διαχείρισης υπολογιστικού φόρτου edge nodes
Delay-tolerant διαπλανητική επικοινωνία	DTN / store-and-forward ως απαίτηση SPA	Αντοχή σε καθυστέρηση, διακοπές σύνδεσης και ασύγχρονη μεταφορά τηλεμετρίας	Μη κρίσιμες εντολές και μοντέλα μεταφέρονται καθυστερημένα· οι κρίσιμες αποφάσεις μένουν onboard

Πίνακας 5-4 Πρωτόκολλα, δικτυακές πρακτικές και αξιοποίηση στο Networking Layer

5.6 Από το IoT στο IoST: εννοιολογική μετάβαση

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) βασίζεται στη διασύνδεση φυσικών αντικειμένων, αισθητήρων, ενεργοποιητών και υπολογιστικών υπηρεσιών για συλλογή δεδομένων, παρακολούθηση κατάστασης και αυτοματοποίηση. Στη συμβατική επίγεια υλοποίηση, μεγάλο μέρος της λειτουργικότητας θεωρεί δεδομένη μια σχετικά σταθερή σύνδεση και οργανώνεται γύρω από υπηρεσίες νέφους. Στη Διαστημική Γεωργία Ακριβείας η υπόθεση αυτή δεν επαρκεί: η μεγάλη και μεταβαλλόμενη καθυστέρηση, οι περίοδοι διακοπής, οι περιορισμοί ισχύος και εύρους ζώνης, η ακτινοβολία και η περιορισμένη δυνατότητα φυσικής συντήρησης μετατρέπουν το πρόβλημα από απλή «σύνδεση πραγμάτων» σε πρόβλημα ανθεκτικής, αυτόνομης και καταναεμημένης λειτουργίας.

Για τον λόγο αυτό, το Διαδίκτυο των Διαστημικών Πραγμάτων (IoST) δεν αντιμετωπίζεται ως απλή επέκταση του IoT μέσω ενός δορυφορικού συνδέσμου, αλλά ως μετατόπιση από ένα μοντέλο με προτεραιότητα στο νέφος σε ένα μοντέλο με προτεραιότητα στην τοπική επεξεργασία επί του σκάφους. Η κρίσιμη επεξεργασία, η επικύρωση δεδομένων, η ανίχνευση ανωμαλιών και οι ενέργειες ελέγχου πρέπει να εκτελούνται τοπικά, ενώ η επικοινωνία με τη Γη λειτουργεί ως ασύγχρονο επίπεδο εποπτείας, επιστημονικής ανάλυσης και αρχειοθέτησης. Η αρχή αυτή συνδέεται άμεσα με το κενό G1 και την ανάγκη για αυτόνομη λήψη αποφάσεων.

Λειτουργικό επίπεδο	Συμβατικό IoT	Διαστημική πρόκληση	Αντιστοίχιση IoST-SPA
Αίσθηση	Αισθητήρες, κάμερες, ενεργοποιητές	Ακτινοβολία, ολίσθηση, δύσκολη συντήρηση	δείκτης υγείας αισθητήρα, μεταδεδομένα βαθμονόμησης, διασταύρωση
Συνδεσιμότητα	Ασύρματα/ενσύρματα δίκτυα σχετικά σταθερής σύνδεσης	Διακοπές, μεγάλες καθυστερήσεις, περιορισμένο εύρος ζώνης	Τοπικό δίκτυο επί του σκάφους, πύλη αιχμής και μεταφορά ανθεκτική σε διακοπές
Ανταλλαγή μηνυμάτων	Μηνύματα σε μονίμως διαθέσιμη υποδομή	Δεν εξασφαλίζεται συνεχής σύνδεση από άκρο σε άκρο	Τοπική ανταλλαγή μηνυμάτων, διακριτή από τη διαπλανητική μεταφορά
Υπολογιστική αιχμής	Προαιρετική τοπική προεπεξεργασία	Η Γη ή το νέφος μπορεί να είναι μη διαθέσιμα	Η αιχμή γίνεται το κύριο επίπεδο επιχειρησιακής επεξεργασίας
Νέφος	Ανάλυση, αποθήκευση, απομακρυσμένος έλεγχος	Η άμεση απομακρυσμένη επέμβαση δεν είναι εγγυημένη	Επίγειο τμήμα ως κόμβος εποπτείας/επιστήμης χωρίς απαίτηση πραγματικού χρόνου
Διαχείριση συσκευών	Ενημερώσεις και παροχή μέσω νέφους	Περιορισμένα παράθυρα επικοινωνίας	Εκδόσεις, σταδιακή ενημέρωση, επικύρωση και επαναφορά

Πίνακας 5-5 Λειτουργική αντιστοίχιση επίγειου IoT και IoST-SPA

5.7 Αρχιτεκτονική δεδομένων και κατηγορίες δεδομένων

Η αρχιτεκτονική IoST-SPA δεν περιγράφει μόνο τη θέση των αισθητήρων και των υπολογιστικών επιπέδων, αλλά και τη μορφή και τη σημασία των δεδομένων που διακινούνται. Σε ένα αυτόνομο διαστημικό αγρόκτημα, η απλή μέτρηση ενός μεγέθους δεν επαρκεί για λήψη απόφασης: κάθε παρατήρηση συνοδεύεται από χρονική σήμανση, ταυτότητα πηγής, μονάδα μέτρησης, κατάσταση ποιότητας, πληροφορία βαθμονόμησης και εκτίμηση αξιοπιστίας. Έτσι το σύστημα μεταβαίνει από ακατέργαστη τηλεμετρία σε επικυρωμένες παρατηρήσεις και, στη συνέχεια, σε εκτιμώμενη κατάσταση. Ο δείκτης υγείας αισθητήρα θεωρείται μέρος του μοντέλου δεδομένων και όχι μόνο εσωτερική λογική του επιπέδου επικύρωσης.

Κατηγορία δεδομένων	Παραδείγματα	Ιδιότητα	Προτεινόμενη διαχείριση
Τηλεμετρία ασφάλειας ζωής	O ₂ /CO ₂ εκτός ορίων, συναγερμοί διαρροής/φωτιάς	Μικρός όγκος, πολύ υψηλή κρισιμότητα	Άμεση τοπική επεξεργασία· P0
Τηλεμετρία ελέγχου	pH, EC, θερμοκρασία, υγρασία, ροή, ανάδραση ενεργοποιητή	Χρονοσειρές που κλείνουν βρόχους ελέγχου	Τοπική αιχμή· P1
Επιχειρησιακή τηλεμετρία	Κατάσταση αντλιών, στάθμη, ενέργεια, κατάσταση υποσυστημάτων	Συνεχής λειτουργική εικόνα	Συνάθροιση/προσωρινή αποθήκευση· P2
Δεδομένα συμβάντων/ανωμαλιών	Ολίσθηση αισθητήρα, βλάβη αντλίας, απόκλιση μοντέλου	Οδηγούμενα από συμβάντα, υψηλή διαγνωστική αξία	Καταγραφή προτεραιότητας + καθυστερημένη μετάδοση
Απεικόνιση	Εικόνες φυτών, επιθεώρηση κάμερας	Μεγάλος όγκος	Τοπική εξαγωγή συμπερασμάτων + επιλεκτική αποστολή
Επιστημονικά/υπερφασματικά	Δεδομένα καταπόνησης, πειραμάτων	Πολύ μεγάλος όγκος, όχι πάντα επείγον	Εξαγωγή χαρακτηριστικών/συμπύεση + προγραμματισμένη μεταφορά
Κατάσταση ψηφιακού διδύμου	Αναμενόμενη βιομάζα, ζήτηση νερού, υπόλοιπα	Παραγόμενη πληροφορία	Συνεχής τοπική ενημέρωση
Τεχνουργήματα μοντέλων	Βάρη μοντέλου, ρυθμίσεις, κατώφλια	Δεδομένα με έκδοση	Επικυρωμένη ενημέρωση με δυνατότητα επαναφοράς
Ιχνηλασιμότητα/καταγραφή	Απόφαση, εμπιστοσύνη, εντολή, παράκαμψη, έκδοση	Μικρός όγκος, υψηλή αξία ιχνηλασιμότητας	Μόνιμο αρχείο καταγραφής μόνο-προσθήκης

Πίνακας 5-6 Κατηγορίες δεδομένων και τρόπος διαχείρισης στην αρχιτεκτονική IoST-SPA.

Μοντέλο δεδομένων, μεταδεδομένα ποιότητας και ιχνηλασιμότητα

Για την υποστήριξη ανθεκτικής λήψης αποφάσεων, κάθε παρατήρηση ακολουθεί ένα κοινό λογικό σχήμα. Δεν απαιτείται η επιλογή συγκεκριμένης τεχνολογίας κωδικοποίησης: αρκεί να οριστούν τα ελάχιστα σημασιολογικά πεδία που πρέπει να διατηρούνται ανεξάρτητα από την υλοποίηση. Η επιλογή αυτή επιτρέπει στο επίπεδο επικύρωσης, στο ψηφιακό δίδυμο και στο επίπεδο λήψης αποφάσεων να εργάζονται πάνω σε συνεπή πληροφορία και υποστηρίζει την εκ των υστέρων ανακατασκευή συμβάντων.

Πεδίο	Περιεχόμενο	Λειτουργικός λόγος
ταυτότητα κόμβου/αισθητήρα	Ταυτότητα πηγής	Ιχνηλασιμότητα και διάκριση πλεοναζόντων αισθητήρων
υποσύστημα	Θάλαμος φυτών, αντιδραστήρας, βρόχος νερού, ECLSS	Σύνδεση της μέτρησης με το φυσικό υποσύστημα
χρονική σήμανση	Χρόνος λήψης	Έλεγχος επικαιρότητας, διάταξης και ανακατασκευής
μεταβλητή/τιμή/μονάδα	Μέγεθος, τιμή, μονάδα	Σημασιολογικά πλήρης παρατήρηση
σημαία ποιότητας	έγκυρη / ύποπτη / άκυρη / ελλιπής	Αποτροπή χρήσης μη αξιόπιστων δεδομένων
δείκτης υγείας αισθητήρα	Συνθετική εκτίμηση υγείας	Στάθμιση εισόδων και λογική εφεδρεία
αβεβαιότητα	Εκτίμηση αβεβαιότητας ή κλάση ακρίβειας	Διαχωρισμός τιμής από εμπιστοσύνη
ταυτότητα/έκδοση βαθμονόμησης	Έκδοση βαθμονόμησης	Ιχνηλασιμότητα και αναπαραγωγιμότητα
προτεραιότητα	P0–P4	Ποιότητα υπηρεσίας, προσωρινή αποθήκευση και προγραμματισμός αποστολής
ακολουθία/ταυτότητα συμβάντος	Αύξων αριθμός ή μοναδικό αναγνωριστικό	Ανίχνευση διπλοτύπων και διαδρομή ελέγχου
κατάσταση λειτουργίας	κανονική / υποβαθμισμένη / ασφαλής	Ερμηνεία της μέτρησης στο σωστό πλαίσιο

Πίνακας 5-7 Ελάχιστο λογικό μοντέλο δεδομένων για παρατηρήσεις IoST-SPA

Η αναπαράσταση κάθε παρατήρησης είναι εννοιολογική και δεν αποτελεί προδιαγραφή κωδικοποίησης. Η τελική υλοποίηση μπορεί να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε μορφή σειριοποίησης, ανάλογα με τους περιορισμούς επεξεργασίας και εύρους ζώνης· η αρχιτεκτονική απαίτηση είναι η διατήρηση του νοήματος και της ιχνηλασιμότητας, όχι η επιβολή συγκεκριμένης μορφής αρχείου.

5.8 Ποιότητα υπηρεσίας, προτεραιοποίηση και πολιτική δεδομένων

Σε ένα διαστημικό αγρο-οικοσύστημα δεν έχουν όλα τα δεδομένα την ίδια επιχειρησιακή αξία. Για τον λόγο αυτό, η αρχιτεκτονική διαθέτει πολιτική προτεραιότητας σε επίπεδο αποστολής, ανεξάρτητη από την ποιότητα υπηρεσίας ενός μεμονωμένου πρωτοκόλλου. Ένας συναγερμός ασφάλειας P0 απαιτεί αυστηρότερη διαχείριση από ένα επιστημονικό σύνολο δεδομένων P4, ακόμη και όταν και τα δύο μεταφέρονται τεχνικά μέσω αξιόπιστου υποστρώματος. Η πολιτική αυτή επιτρέπει στην πύλη αιχμής να εφαρμόζει επιλεκτική μετάδοση, μειώνοντας το εύρος ζώνης χωρίς μείωση της επιχειρησιακής επίγνωσης.

Κατηγορία προτεραιότητας	Περιεχόμενο	Πολιτική IoST-SPA
P0 — Ασφάλεια ζωής	Κίνδυνος πληρώματος ή καταστροφική βλάβη	Άμεση τοπική αντίδραση, εφεδρεία, καταγραφή· η Γη ενημερώνεται αλλά δεν βρίσκεται στον κρίσιμο βρόχο
P1 — Κρίσιμα ελέγχου	Μεταβλητές που επηρεάζουν άμεσα τον έλεγχο κλειστού βρόχου	Τοπική επεξεργασία και χαμηλή καθυστέρηση στο τοπικό δίκτυο
P2 — Επιχειρησιακά	Κατάσταση υποσυστημάτων και κανονική τηλεμετρία	Συνάθροιση, προσωρινή αποθήκευση και περιοδική μετάδοση
P3 — Επιστημονικά	Επιστημονικές μετρήσεις, εικόνες, δεδομένα υψηλής ανάλυσης	Συμπίεση, ομαδοποίηση, προγραμματισμένη αποστολή

Κατηγορία προτεραιότητας	Περιεχόμενο	Πολιτική IoST-SPA
P4 — Αρχειακά	Ιστορικά αρχεία, μη επείγοντα πακέτα μοντέλων	Μεταφορά όταν υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης/παράθυρο επικοινωνίας

Πίνακας 5-8 Συνοπτική αποτύπωση ερευνητικών κενών και μελλοντικών κατευθύνσεων.

5.9 Επικοινωνία ανθεκτική σε καθυστέρηση Γης–διαστήματος

Η σύνδεση αγροκτήματος–κέντρου ελέγχου μοντελοποιείται ως διαδρομή με πιθανή καθυστέρηση, διακοπές και περιορισμένα παράθυρα επικοινωνίας. Η λογική της δικτύωσης ανθεκτικής σε καθυστέρηση αντιμετωπίζει το πρόβλημα μέσω λειτουργίας αποθήκευσης-και-προώθησης και αποσύνδεσης της εφαρμογής από την απαίτηση μόνιμης σύνδεσης από άκρο σε άκρο. Το πρωτόκολλο δέσμης BPv7 έχει τυποποιηθεί από το IETF ως RFC 9171, ενώ το CCSDS έχει δημοσιεύσει πειραματική προδιαγραφή του για διαστημικές εφαρμογές. Η ουσία για την εργασία δεν είναι η λεπτομερής υλοποίηση αλλά η αρχιτεκτονική συνέπεια: καμία κρίσιμη απόφαση δεν εξαρτάται από σύγχρονη επικοινωνία μετ' επιστροφής προς τη Γη.

Η ροή διακρίνεται σε δύο κατευθύνσεις. Στη ζεύξη προς το αγρόκτημα μεταφέρονται μη επείγουσες ενημερώσεις πολιτικής, μοντέλα, νέα σχέδια πειραμάτων και εντολές που περνούν από πιστοποίηση, έλεγχο έκδοσης και τοπική επικύρωση πριν ενεργοποιηθούν. Στη ζεύξη προς τη Γη μεταφέρονται συμπυκνωμένη τηλεμετρία, συμβάντα, επιστημονικά προϊόντα, αρχεία καταγραφής και επιλεγμένα ακατέργαστα δεδομένα. Το τοπικό αγρόκτημα παραμένει η επιχειρησιακή αρχή για τους κλειστούς βρόχους ελέγχου, ενώ το κέντρο ελέγχου λειτουργεί ως αρχή εποπτείας και επιστημονικής ανάλυσης για μη χρονικά κρίσιμες ενέργειες.

5.10 Επικοινωνιακή ασφάλεια και ασφάλεια δεδομένων

Η αρχιτεκτονική ανθεκτικότητας συμπληρώνεται με ρητό σκέλος ασφάλειας επικοινωνιών και δεδομένων. Η αξιοπιστία απέναντι σε αστοχίες υλικού ή ολίσθηση αισθητήρα δεν ταυτίζεται με την προστασία απέναντι σε μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, αλλοίωση δεδομένων ή κακόβουλη εντολή. Κάθε διαδρομή ελέγχου εξετάζει πιστοποίηση, εξουσιοδότηση, ακεραιότητα, εμπιστευτικότητα, προστασία από επανάληψη όπου απαιτείται, ασφαλή ενημέρωση λογισμικού/μοντέλων, καταγραφή ελέγχου και δυνατότητα επαναφοράς. Οι μηχανισμοί BPsec (RFC 9172) και το πρωτόκολλο ασφάλειας ζεύξης δεδομένων του CCSDS παρουσιάζονται ως διαθέσιμες τυποποιημένες επιλογές και όχι ως

τελική υλοποίηση πτήσης, καθώς η τελική επιλογή εξαρτάται από το δίκτυο της αποστολής και τις διαδικασίες πιστοποίησης.

Λειτουργία ασφάλειας	Αρχιτεκτονική απαίτηση	Στόχος
Ταυτότητα συσκευής	Κάθε κόμβος/ελεγκτής έχει μοναδική και επαληθεύσιμη ταυτότητα	Αποτροπή πλαστής συσκευής/μέτρησης
Πιστοποίηση και εξουσιοδότηση	Έλεγχος ποιος διαβάζει/στέλνει εντολές	Προστασία ενεργοποίησης και ρυθμίσεων
Ακεραιότητα	Ανίχνευση αλλοίωσης δεδομένων/εντολών	Αξιόπιστη λήψη αποφάσεων
Εμπιστευτικότητα	Κρυπτογράφηση όπου απαιτείται	Προστασία δεδομένων αποστολής
Ασφαλής ενημέρωση	Υπογεγραμμένη/με έκδοση ενημέρωση + σταδιακή ενεργοποίηση	Αποτροπή μη έγκυρης εγκατάστασης
Επικοινωνία	Επιστροφή στην τελευταία γνωστή καλή έκδοση	Επιχειρησιακή ανάκαμψη
Διαδρομή ελέγχου	Αμετάβλητο αρχείο αποφάσεων και εντολών	Τεκμηρίωση, επαλήθευση και αναπαραγωγικότητα

Πίνακας 5-9 Ελάχιστες λειτουργίες ασφάλειας επικοινωνιών/δεδομένων για το IoST-SPA.

5.11 Παράδειγμα ροής από άκρο σε άκρο

Έστω ότι αισθητήρας θερμοκρασίας σε φωτοβιοαντιδραστήρα καταγράφει απόκλιση από το αναμενόμενο εύρος. Η μέτρηση συνοδεύεται από χρονική σήμανση, ταυτότητα αισθητήρα, μεταδεδωμένα βαθμονόμησης και δείκτη υγείας. Το επίπεδο συγχώνευσης και επικύρωσης ελέγχει επικαιρότητα, φυσιολογικό εύρος και συμφωνία με πλεονάζουσες μετρήσεις. Εφόσον η τιμή κριθεί έγκυρη, ενημερώνεται το ψηφιακό δίδυμο και υπολογίζεται το υπόλοιπο μεταξύ παρατηρούμενης και αναμενόμενης κατάστασης. Αν η απόκλιση υπερβεί τα όρια, ενεργοποιείται η αντίστοιχη διαδρομή απόφασης: για προεγκεκριμένη ενέργεια χαμηλού ρίσκου ο τοπικός ελεγκτής προσαρμόζει ψύξη ή κυκλοφορία, ζητά επιβεβαίωση ενεργοποιητή και επαληθεύει το αποτέλεσμα μέσω των επόμενων μετρήσεων· σε υψηλή κρισιμότητα το επίπεδο ανθεκτικότητας επιβάλλει ασφαλή λειτουργία ή εφεδρεία ECLSS.

Το συμβάν μεταδίδεται προς το κέντρο ελέγχου σύμφωνα με την προτεραιότητά του: μια σύνοψη ασφάλειας εισέρχεται άμεσα στην υψηλότερη διαθέσιμη ουρά, ενώ πλήρεις χρονοσειρές και σχετικά σύνολα εικόνων μεταφέρονται αργότερα μέσω αποθήκευσης-και-προώθησης ή υπηρεσίας μεταφοράς αρχείων. Έτσι διαχωρίζεται ο επιχειρησιακός βρόχος πραγματικού χρόνου από τον καθυστερημένο βρόχο εποπτείας και επιστήμης. Η συνολική ακολουθία είναι: μέτρηση αισθητήρα → χρονική σήμανση, ταυτότητα και μεταδεδωμένα βαθμονόμησης → επικύρωση ποιότητας/υγείας αισθητήρα → συγχώνευση δεδομένων → σύγκριση με το ψηφιακό δίδυμο → απόφαση με βάση κανόνες/τεχνητή νοημοσύνη → τοπική ενεργοποίηση → επιβεβαίωση και επαλήθευση κλειστού βρόχου → μόνιμη

καταγραφή συμβάντος/ελέγχου → ανάθεση προτεραιότητας → ουρά αποθήκευσης-και-προώθησης ή μεταφοράς αρχείων → κέντρο ελέγχου/αρχείο/επιστημονική ανάλυση.

5.12 Edge Computing και Digital Twin: τοπική επεξεργασία και expected-state control

Η ανάγκη τοπικής επεξεργασίας προκύπτει από δύο περιορισμούς: την καθυστέρηση επικοινωνίας και το περιορισμένο εύρος ζώνης. Το βιβλιογραφικό σώμα παρέχει ενδείξεις μετάβασης από απλή συλλογή δεδομένων προς επεξεργασία κοντά στην πηγή. Το cloud framework των Janairo κ.ά. ενσωματώνει επεξεργασία δεδομένων καλλιέργειας εν πτήσει, ενώ το PeersimGym των Metelo κ.ά. εξετάζει task offloading με πράκτορες MARL. Το ADA δείχνει ότι ακόμη και πριν από το AI απαιτείται τοπική επεξεργασία σήματος για θόρυβο και outliers.

Το ψηφιακό δίδυμο ενισχύει το Edge Layer προσθέτοντας expected-state μοντελοποίηση. Στη μελέτη των Liang κ.ά., το digital twin ανάπτυξης μαρουλιού σε έξι κλιματικές ζώνες αξιοποιεί Random Forest Regression και επιτυγχάνει $R^2=0,984-0,986$ με MAPE περίπου 6% για πρόβλεψη βιομάζας. Η επίδοση αυτή δεν σημαίνει ότι το ίδιο μοντέλο μεταφέρεται αυτούσιο στο διάστημα· δείχνει όμως ότι οι προβλέψεις βιομάζας βάσει IoT δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μηχανισμός expected state. Στο SPA, το Digital Twin δεν είναι απλώς εργαλείο απεικόνισης αλλά κόμβος ελέγχου που συγκρίνει πραγματικές τιμές με αναμενόμενες τιμές και τροφοδοτεί το Confidence Score.

Για τον λόγο αυτό, το space-specific Digital Twin του SPA ορίζεται ως υβριδικό και όχι αποκλειστικά data-driven. Ο πρώτος πυλώνας είναι τα data-driven μοντέλα φυτικής ανάπτυξης, χρήσιμα για πρόβλεψη βιομάζας και ανίχνευση αποκλίσεων όταν υπάρχουν επαρκή δεδομένα. Ο δεύτερος πυλώνας είναι τα μηχανιστικά και μεταβολικά μοντέλα φωτοβιοαντιδραστήρων, όπως τα μοντέλα Limnospira των Roughon κ.ά. και τα μεταβολικά δίκτυα Arthrospira των Maton κ.ά. Αυτά τα μοντέλα είναι κρίσιμα επειδή εισάγουν φυσικοχημικούς και βιολογικούς περιορισμούς, όπως μεταφορά μάζας, pH, CO_2/O_2 και μεταβολικές ροές. Επομένως, το Digital Twin του SPA λειτουργεί ως expected-state engine που συνδυάζει στατιστική πρόβλεψη και βιολογική αιτιότητα, μειώνοντας τον κίνδυνο υπερπροσαρμογής ενός καθαρά AI μοντέλου.

Λειτουργία	Τι έχει χρησιμοποιηθεί	Ρόλος στο SPA
Pre-processing	Καθαρισμός δεδομένων, filtering, outlier removal	Μείωση ψευδών συναγεμίων και προστασία ΑΙ αποφάσεων από στιγμιαίο θόρυβο
Onboard inference	YOLOv8/EfficientNetB4 για εικόνες στο framework Janairo	Τοπική οπτική ανάλυση όπου απαιτείται μείωση μεταδιδόμενων δεδομένων
Task offloading	MARL για επιλογή τοπικής ή γειτονικής επεξεργασίας	Δυναμική κατανομή υπολογιστικού φόρτου μεταξύ edge nodes
Expected-state prediction	Digital twin με RF Regression, $R^2=0,984-0,986$, MAPE ~6%	Πρόβλεψη βιομάζας και deviation estimation
System dynamics	Παράμετροι EC, pH, θερμοκρασία νερού, αναλογίες N-P-K	Μοντελοποίηση παραγωγής και σεναρίων ελέγχου
Mechanistic PBR model	Μοντέλο Limnospira για MELiSSA/ISS με μεταφορά μάζας, pH και pCO_2	Expected-state engine για O_2/CO_2 /βιομάζα και έλεγχο αποκλίσεων PBR
Metabolic model / MFA	Μεταβολικό δίκτυο Arthrospira sp. PCC 8005 με πειραματική επικύρωση	Βιολογικοί περιορισμοί και mass-balance constraints για το BLSS Digital Twin

Πίνακας 5-10 Τεχνικές επεξεργασίας και μοντελοποίησης στο Edge Computing και Digital Twin Layer

5.13 AI Decision Layer: από επιμέρους AI τεχνικές σε confidence-based autonomy

Στις μελέτες που αναλύσαμε περιλαμβάνονται πολλές AI τεχνικές, αλλά όχι ενιαία στρατηγική λήψης αποφάσεων για αυτόνομη διαστημική γεωργία. Η μελέτη υπερφασματική αναγνώρισης των Qin κ.ά. χρησιμοποιεί κάμερα line-scan 400-1000 nm, UV-A φωτισμό και επτά αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, επιτυγχάνοντας ακρίβεια 94,3% την 4η ημέρα stress ξηρασίας και 98,5% την 7η ημέρα. Το digital twin των Liang κ.ά. δείχνει υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης βιομάζας. Η μελέτη Rewicki κ.ά. δείχνει unsupervised ανίχνευση ανωμαλιών σε BLSS telemetry. Οι Metelo κ.ά. εισάγουν MARL για task offloading. Αυτά τα παραδείγματα δείχνουν ικανότητες διάγνωσης, πρόβλεψης και βελτιστοποίησης, αλλά παραμένουν διακριτά.

Η συμβολή του SPA είναι η σύνθεση αυτών των διακριτών τεχνικών σε ένα Confidence Score. Ο δείκτης δεν είναι απλή πιθανότητα ταξινόμησης του AI. Συνδυάζει: εμπιστοσύνη μοντέλου, αξιοπιστία αισθητήρων, συμφωνία με το Digital Twin, σοβαρότητα συμβάντος και διαθεσιμότητα επικοινωνίας. Έτσι, η ίδια διάγνωση μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετική

απόφαση ανάλογα με το αν οι αισθητήρες είναι αξιόπιστοι, αν το ψηφιακό δίδυμο συμφωνεί και αν το πλήρωμα μπορεί να επιβεβαιώσει εγκαίρως.

AI λειτουργία	Τεκμηριωμένο παράδειγμα	Ρόλος στο SPA	Περιορισμός
Reactive diagnosis	Υπερφασματική ανίχνευση stress, 400-1000 nm, 94,3%-98,5% ακρίβεια	Γρήγορη ανίχνευση stress/ασθένειας	Κίνδυνος ψευδών συναγερμών χωρίς sensor validation
Image classification	YOLOv8 και EfficientNetB4 στο cloud computing framework	Ταξινόμηση εικόνων καλλιέργειας	Ανάγκη δεδομένων και υπολογιστικού κόστους
Predictive modelling	Random Forest Regression, R2=0,984-0,986, MAPE ~6%	Πρόβλεψη βιομάζας / expected state	Μεταφορά στο διάστημα απαιτεί νέα calibration
Anomaly detection	Unsupervised discovery/isolation σε BLSS telemetry	R1/R2 resilience και event alerts	Δεν συνδέεται από μόνο του με actuators
MARL / task offloading	Πράκτορες MARL για επιλογή τοπικής επεξεργασίας ή μεταφοράς εργασίας	Διαχείριση υπολογιστικού φόρτου edge nodes	Η exploration φάση πρέπει να γίνεται σε προσομοίωση
System dynamics control	Παραγωγή ντομάτας με EC, pH, θερμοκρασία νερού, N-P-K	Σενάρια ελέγχου και crop schedule	Δεν αποτελεί πλήρες autonomous AI decision layer

Πίνακας 5-11 AI τεχνικές από το βιβλιογραφικό σώμα και ρόλος τους στο AI Decision Layer

5.14 Ιεραρχία αποφάσεων L1-L4

Με βάση τα παραπάνω, το SPA προτείνει ιεραρχία αποφάσεων L1-L4. Η ιεραρχία αυτή δεν αντιγράφει κάποια μεμονωμένη μελέτη, αλλά λειτουργεί ως συνθετικός μηχανισμός που συνδυάζει τεχνικές από sensing, anomaly detection, digital twin και AI prediction. Στο L1 εκτελούνται αυτόνομες ενέργειες όταν η εμπιστοσύνη είναι υψηλή. Στο L2 απαιτείται επιβεβαίωση πληρώματος. Στο L3 αποστέλλονται δεδομένα για επίγεια ανάλυση ή εφαρμόζεται συντηρητική στρατηγική λόγω time-delay. Στο L4 ενεργοποιείται ασφαλής λειτουργία όταν η αβεβαιότητα ή η αστοχία είναι υψηλή.

Επίπεδο	Συνθήκη	Απόφαση	Ενδεικτικό σενάριο
L1	Υψηλή εμπιστοσύνη	Αυτόνομη ενέργεια και καταγραφή	Αύξηση θρέψης όταν EC/pH/biomass trend συμφωνούν με Digital Twin
L2	Μέση εμπιστοσύνη	Ειδοποίηση πληρώματος και timeout policy	Πιθανό stress σε εικόνες με ικανοποιητική αλλά όχι απόλυτη βεβαιότητα

L3	Χαμηλή εμπιστοσύνη ή ανάγκη ανάλυσης	Αποστολή δεδομένων, συντηρητική δράση ή αναμονή αν δεν είναι κρίσιμο	Ασυμφωνία αισθητήρων CO ₂ /O ₂ ή απόκλιση PBR από expected state
L4	Αστοχία ή κρίσιμη αβεβαιότητα	Παράδοση ελέγχου στο R-layer για safe mode / graceful degradation	Πολλαπλοί αισθητήρες εκτός λειτουργίας, ύποπτη τηλεμετρία ή αδύνατη διάγνωση

Πίνακας 5-12 AI τεχνικές από το βιβλιογραφικό σώμα και ρόλος τους στο AI Decision Layer

5.15 Σχέση L1–L4 και R1–R4

Η ιεραρχία L1-L4 δεν πρέπει να συγχέεται με τα Resilience Layers R1-R4 της Ενότητας 5.10. Το L-layer αποτελεί το επίπεδο λήψης αποφάσεων του AI: επιλέγει τι πρέπει να γίνει για τη βελτιστοποίηση της καλλιέργειας, ανάλογα με το Confidence Score. Το R-layer λειτουργεί ως ανεξάρτητο επίπεδο ανθεκτικότητας και ασφάλειας, δηλαδή ως watchdog που μπορεί να υπερισχύσει του AI όταν εντοπίζει κρίσιμη αστοχία αισθητήρα, ενεργοποιητή, δικτύου ή βιολογικού υποσυστήματος. Με αυτή τη διάκριση, το L4 δεν είναι ξεχωριστό δεύτερο safe mode· είναι η κατάσταση στην οποία το AI αναγνωρίζει ότι δεν μπορεί να αποφασίσει αξιόπιστα και παραδίδει τον έλεγχο στο R-layer για graceful degradation ή emergency fallback.

5.16 BLSS Integration Interface: μετατροπή βιολογικών κύκλων σε IoST κόμβους

Το BLSS Integration Interface είναι απαραίτητο για να μη μείνει η αρχιτεκτονική στο επίπεδο ενός έξυπνου θερμοκηπίου. Οι μελέτες MELiSSA δείχνουν ότι τα βιοαναγεννητικά συστήματα είναι διαμερισματοποιημένα και βασίζονται σε ροές άνθρακα, αζώτου, οξυγόνου, νερού, θρεπτικών, βιομάζας και αποβλήτων. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες *Limnospira* και *Chlorella* λειτουργούν ως υποψήφιοι κόμβοι αναγέννησης αέρα και παραγωγής βιομάζας. Η βιβλιογραφία για BLSS/ECLSS υπογραμμίζει ότι το πρόβλημα δεν είναι μόνο η ύπαρξη βιολογικών υποσυστημάτων, αλλά η αξιόπιστη ενσωμάτωσή τους σε συνολική αρχιτεκτονική υποστήριξης ζωής.

Στο SPA, το BLSS Integration Interface δεν είναι ανεξάρτητο BLSS. Είναι ψηφιακό και αρχιτεκτονικό επίπεδο μετάφρασης: μετατρέπει βιολογικές μεταβλητές σε μετρήσιμα signals, στόχους ελέγχου και περιορισμούς για το AI Decision Layer. Για παράδειγμα, η παραγωγή O₂ από έναν φωτοβιοαντιδραστήρα δεν αποθηκεύεται απλώς ως βιολογικό

δεδομένο. Γίνεται μεταβλητή ελέγχου που συνδέεται με CO₂ εισόδου, φωτισμό, ρυθμό ροής, βιομάζα και ανάγκες ατμόσφαιρας του χώρου διαβίωσης του πληρώματος .

Η ένταξη του ECLSS είναι απαραίτητη για να αποφευχθεί η παρερμηνεία ότι το SPA στηρίζεται αποκλειστικά σε βιολογικά υποσυστήματα. Τα φυσικοχημικά υποσυστήματα υποστήριξης ζωής λειτουργούν ως buffer έναντι των βιολογικών διακυμάνσεων: απορροφούν αιχμές CO₂, απομακρύνουν VOCs, σταθεροποιούν O₂/H₂O και παρέχουν εφεδρεία κατά την εκκίνηση, την αστοχία ή τη μεταβατική λειτουργία του BLSS. Επομένως, το BLSS Integration Interface πρέπει να διασυνδέει όχι μόνο φωτοβιοαντιδραστήρες, υδροπονία και bio-ISRU, αλλά και το φυσικοχημικό ECLSS ως κρίσιμο υποσύστημα ασφάλειας.

Υποσύστημα	Είσοδοι	Έξοδοι	Ρόλος στο SPA	Τεχνική άγκυρα
Φωτοβιοαντιδραστήρες Limnospira / Spirulina	CO ₂ εισόδου, φως, θερμοκρασία, ροή	O ₂ , βιομάζα, pH, χλωροφύλλη	Ρύθμιση φωτισμού/CO ₂ με στόχο O ₂ και βιομάζα	MELiSSA PBR, ARTHROSPIRA-C, ground demonstration
Chlorella PBR	CO ₂ , φως, pH, θρεπτικά	O ₂ , βιομάζα, πρωτεΐνη, πιθανές επιδράσεις στα φυτά	Συμπληρωματική παραγωγή O ₂ και πρωτεΐνης	Βιομάζα έως 4 g/L ημερησίως, πρωτεΐνη ~55%
MELiSSA compartments	οργανικά απόβλητα, άζωτο, άνθρακας	CO ₂ , NH ₄ , θρεπτικά, ανακυκλωμένη ύλη	Κλειστός κύκλος θρεπτικών και ανακύκλωση αποβλήτων	Πιλοτική ενσωμάτωση nitrifying, photosynthetic, animal, plant compartments
Υδροπονική καλλιέργεια	EC, pH, θρεπτικά, φως, θερμοκρασία ρίζας	βιομάζα, transpiration, stress indicators	Παραγωγή τροφής και κατανάλωση θρεπτικών εντός BLSS	Ανώτερα φυτά σε BLSS και space farming reviews
Bio-ISRU κυανοβακτήρια	ατμόσφαιρα N ₂ /CO ₂ , ρεγόλιθος, ούρα ή τοπικοί πόροι	βιομάζα, O ₂ , θρεπτικά, πιθανή αποσάθρωση πόρων	Μελλοντική επέκταση του BLSS Interface προς ISRU	Ανάπτυξη σε low-pressure N ₂ /CO ₂ και αξιοποίηση in situ πόρων
Φυσικοχημικό ECLSS (εφεδρικό υποσύστημα)	CO ₂ πληρώματος, VOCs φυτών/μικροοργανισμών,	Καθαρισμένος αέρας, H ₂ O, σταθεροποιημένες	Buffer ασφάλειας που απορροφά βιολογικές	Υβριδική λειτουργία BLSS/ECLSS για

	περίσσεια O ₂ , νερό και αέρας habitat	συγκεντρώσεις O ₂ /CO ₂ , απομάκρυνση ιχθυορύπων	διακυμάνσεις και αναλαμβάνει δράση στο R4 Emergency/Fallback	σταθεροποίηση life support
--	---	--	--	----------------------------

Πίνακας 5-13 BLSS υποσυστήματα, ροές μάζας και μεταφορά τους σε IoST-addressable κόμβους

5.17 Resilience Layers: από anomaly detection σε αρχιτεκτονική ανθεκτικότητας

Η ανθεκτικότητα στο SPA δεν περιορίζεται σε redundancy υλικού. Προκύπτει από συνδυασμό ελέγχου ποιότητας δεδομένων, ανίχνευσης ανωμαλιών, expected-state αποκλίσεων, απομόνωσης υποσυστημάτων και safe-mode στρατηγικών. Το βιβλιογραφικό σώμα παρέχει επιμέρους τεχνικές: το ADA εφαρμόζει outlier removal σε PBR δεδομένα, η μελέτη των Rewicki κ.ά. εφαρμόζει unsupervised anomaly discovery σε BLSS telemetry, ενώ οι PBR και MELiSSA μελέτες δείχνουν ότι αστοχία ενός βιολογικού διαμερίσματος μπορεί να επηρεάσει ροές O₂, CO₂ και.

Η αρχιτεκτονική R1-R4 συνθέτει αυτά τα στοιχεία σε επιχειρησιακή κλιμάκωση. Στο R1 επιχειρείται αυτόματη διόρθωση ή επαναβαθμονόμηση. Στο R2 απομονώνεται ο προβληματικός κόμβος και ενεργοποιείται εφεδρική ροή. Στο R3 το σύστημα μειώνει λειτουργικότητα αλλά διατηρεί κρίσιμες καλλιέργειες ή κρίσιμη αναγέννηση αέρα. Στο R4 το σύστημα αποθηκεύει κατάσταση, ειδοποιεί πλήρωμα/Γη και περνά σε λειτουργία κινδύνου.

Layer	Πότε ενεργοποιείται	Ενέργεια SPA	Βιβλιογραφική τεχνική άγκυρα
R1 Reactive correction	outlier, προσωρινή απόκλιση, sensor stale	φιλτράρισμα, επανάληψη μέτρησης, τοπική επανεκκίνηση	Mapstone ADA filtering / outlier removal
R2 Fault isolation	επίμονη απόκλιση ή ασυμφωνία αισθητήρων	απομόνωση κόμβου, χρήση backup sensor, event log	Rewicki anomaly isolation σε BLSS telemetry
R3 Safe mode	βλάβη υποσυστήματος ή αβέβαιη βιολογική κατάσταση	μείωση λειτουργιών, διατήρηση κρίσιμων κύκλων CO ₂ /O ₂ /νερού	BLSS integration constraints από MELiSSA/PBR
R4 Emergency	κίνδυνος για πλήρωμα ή αδυναμία ανάκτησης	χειροκίνητη επέμβαση, ECLSS fallback, αποθήκευση seeds/data	BLSS/ECLSS integration as critical mission issue

Πίνακας 5-14 Επίπεδα ανθεκτικότητας R1–R4 και ενέργειες ανάκαμψης

5.18 Περιορισμοί της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι εννοιολογική και βασίζεται σε σύνθεση του βιβλιογραφικού σώματος. Δεν αποτελεί flight-qualified engineering design. Συνεπώς, δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως τελικές προδιαγραφές οι ενδεικτικές τεχνολογικές επιλογές που αναφέρονται στο κεφάλαιο. Όπου το βιβλιογραφικό σώμα παρέχει μετρήσιμες τιμές - για παράδειγμα pH 6-8 και 20°C σε PBR model, 400-1000 nm σε hyperspectral imaging, $R^2=0,984-0,986$ σε digital twin, ή 94,3%-98,5% accuracy σε stress detection - αυτές χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς. Όπου δεν παρέχει τιμές - όπως ηλεκτρονική TID αντοχή, flight processor επιλογές ή πλήρη rad-hard IoST stack - το κεφάλαιο αποφεύγει να εισαγάγει αυθαίρετες ποσοτικές προδιαγραφές.

Επιπλέον, οι περισσότερες μελέτες του βιβλιογραφικού σώματος αξιολογούν επιμέρους υποσυστήματα και όχι ενιαίο space farming σύστημα. Οι PBR μελέτες τεκμηριώνουν βιολογική λειτουργία, οι IoT μελέτες τεκμηριώνουν επικοινωνία ή αυτοματισμό, οι AI μελέτες τεκμηριώνουν διάγνωση ή πρόβλεψη, και τα BLSS έργα τεκμηριώνουν κλειστούς κύκλους. Η πρόκληση που παραμένει είναι η επικύρωση της ενοποίησης όλων αυτών σε ενιαίο σύστημα με πραγματικό πληρώμα, καθυστέρηση επικοινωνίας, περιορισμένη ενέργεια και διαστημική ακτινοβολία.

6 Εννοιολογικό Μοντέλο Space Farm

Το παρόν κεφάλαιο επαναδιατυπώνει το εννοιολογικό μοντέλο του Space Farm ως λειτουργική σύνθεση των Κεφαλαίων 3–5. Το Κεφάλαιο 3 ανέδειξε τις επιμέρους τεχνολογικές γραμμές του βιβλιογραφικού σώματος, το Κεφάλαιο 4 τις συγκριτικές αδυναμίες και τα κενά G1–G6, ενώ το Κεφάλαιο 5 πρότεινε την IoST-SPA αρχιτεκτονική δεδομένων, απόφασης, ελέγχου και ανθεκτικότητας. Το Κεφάλαιο 6 απαντά πλέον στο ερώτημα πώς τα στοιχεία αυτά μπορούν να οργανωθούν σε ένα συνεκτικό μοντέλο λειτουργίας διαστημικού θερμοκηπίου.

Το μοντέλο δεν παρουσιάζεται ως τελικό μηχανολογικό σχέδιο αποστολής ούτε ως πειραματικά επικυρωμένο σύστημα. Αποτελεί εννοιολογική προδιαγραφή, βασισμένη σε τεχνολογικές άγκυρες του βιβλιογραφικού σώματος: φυτοθαλάμους και αναλογικά θερμοκήπια, φωτοβιοαντιδραστήρες *Limnospira/Chlorella*, συστήματα MELiSSA, IoST/cloud-edge αρχιτεκτονικές, υπερφασματική παρακολούθηση, anomaly detection, μηχανιστικά μοντέλα PBR και υβριδικά digital twins.

Η βασική μεθοδολογική αρχή είναι ότι κάθε στοιχείο του μοντέλου πρέπει να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο κενό του Κεφαλαίου 4 και να συνδέεται με τεκμηρίωση από το βιβλιογραφικό σώμα. Όπου οι υπάρχουσες δημοσιεύσεις παρέχουν ποσοτικές τιμές, αυτές χρησιμοποιούνται ως ενδεικτικές περιοχές αναφοράς. Όπου δεν παρέχουν τέτοια τιμή, το παρόν κεφάλαιο δεν εισάγει αυθαίρετες μηχανολογικές προδιαγραφές, αλλά δηλώνει την απαίτηση ως σχεδιαστική υπόθεση προς μελλοντική επικύρωση.

6.1 Ρόλος και όρια του εννοιολογικού μοντέλου Space Farm

Το Space Farm είναι το επιχειρησιακό επίπεδο της IoST-SPA αρχιτεκτονικής. Αν το Κεφάλαιο 5 περιγράφει τα επίπεδα δεδομένων, επικοινωνίας, ψηφιακού διδύμου, λήψης αποφάσεων και ανθεκτικότητας, το Κεφάλαιο 6 περιγράφει πώς αυτά τα επίπεδα εμφανίζονται σε ένα λειτουργικό σύστημα: σε φυσικούς χώρους, βιολογικούς κόμβους, κύκλους εργασιών, ροές μάζας, σχέσεις με το πλήρωμα, σενάρια αστοχίας και διαδικασίες επικύρωσης.

Το μοντέλο αντιμετωπίζει κυρίως δύο κενά: το G4, δηλαδή τη χαμηλή αυτονομία ρομποτικής και ενεργοποιητών, και το G6, δηλαδή την απουσία ενιαίου εννοιολογικού μοντέλου που να ενώνει BLSS, IoST, AI, Digital Twin, ανθεκτικότητα και επιχειρησιακή λειτουργία. Παράλληλα, αξιοποιεί τα G1–G5 ως δομικούς περιορισμούς: η onboard αυτονομία, η αξιοπιστία αισθητήρων, η BLSS/ECLSS ολοκλήρωση, το space-specific digital twin και η resilience hierarchy δεν είναι προαιρετικά στοιχεία, αλλά προϋποθέσεις λειτουργίας.

Κενό	Λειτουργική απαίτηση	Ενσωμάτωση στο Κεφάλαιο 6
G1: εξάρτηση από επίγειο έλεγχο	L1–L4 ιεραρχία αποφάσεων, onboard-first λειτουργία και delayed telemetry.	Μεταφορά του AI Decision Layer σε καθημερινούς και εβδομαδιαίους κύκλους λειτουργίας.
G2: ανεπαρκές αξιόπιστο sensing/IoST	Sensor health score, data fusion, local validation και edge pre-processing.	Καμία ενέργεια ελέγχου δεν βασίζεται σε μοναδική ακατέργαστη μέτρηση.
G3: ελλιπής BLSS/ECLSS/IoST ολοκλήρωση	BLSS Integration Interface με φυσικοχημικό ECLSS buffer.	Οι βιολογικοί κύκλοι CO ₂ /O ₂ /νερού/θρεπτικών γίνονται IoST-addressable κόμβοι.
G4: χαμηλή αυτονομία ρομποτικής	Actuation layer με κανόνες fallback και ρομποτικές εργασίες χαμηλού κινδύνου.	Το πλήρωμα μετατοπίζεται από χειριστή σε επιθεωρητή/επικυρωτή.
G5: απουσία space-specific digital twin	Υβριδικό digital twin: data-driven + μηχανιστικό + μεταβολικό.	Το μοντέλο λειτουργεί ως expected-state engine και όχι μόνο ως visualization.
G6: απουσία ολοκληρωμένου μοντέλου	Φυσική διάταξη, κύκλοι, σενάρια αστοχίας, validation path.	Το Space Farm γίνεται συνθετικό λειτουργικό μοντέλο, όχι απλή λίστα τεχνολογιών.

Πίνακας 6-1 Αντιστοίχιση κενών G1–G6 με λειτουργικά στοιχεία του Space Farm

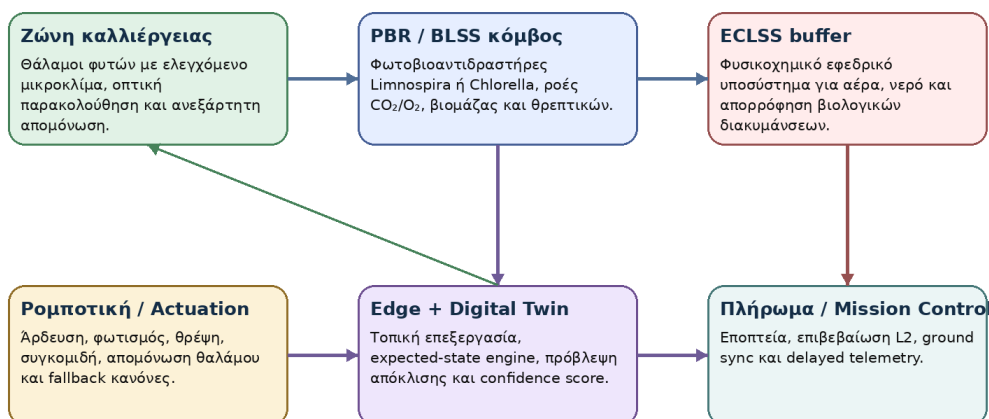
6.2 Φυσική και λογική διάταξη του Space Farm

Η φυσική διάταξη του Space Farm δεν πρέπει να αντιμετωπιστεί ως αρχιτεκτονική κάτοψη κτιρίου, αλλά ως λειτουργική διάταξη υποσυστημάτων. Η λογική της είναι αρθρωτή: κάθε θάλαμος, φωτοβιοαντιδραστήρας, ECLSS υποσύστημα, κόμβος αισθητήρων και μονάδα ενεργοποιητών πρέπει να μπορεί να απομονωθεί, να επανεκκινηθεί ή να τεθεί σε υποβαθμισμένη λειτουργία χωρίς να συμπαρασύρει ολόκληρο το σύστημα.

Η αρθρωτότητα αυτή προκύπτει από δύο ευρήματα του βιβλιογραφικού σώματος. Πρώτον, οι υφιστάμενοι φυτοθάλαμοι και τα αναλογικά συστήματα επιτυγχάνουν έλεγχο

μικροκλίματος και παρακολούθηση φυτικής υγείας, αλλά δεν αποτελούν πλήρως αυτόνομα, fault-tolerant συστήματα μεγάλης διάρκειας. Δεύτερον, τα BLSS και οι φωτοβιοαντιδραστήρες έχουν υψηλή βιολογική αξία, αλλά εμφανίζουν αυξημένη ευπάθεια σε cross-talk, biofouling, αστάθεια καλλιέργειας και ανάγκη διαρκούς monitoring.

Εννοιολογικό μοντέλο Space Farm: φυσικά υποσυστήματα και ροές



Εικόνα 6-1 Εννοιολογική φυσική και λογική διάταξη Space Farm. Το μοντέλο διαχωρίζει ζώνες φυτικής καλλιέργειας, PBR/BLSS κόμβους, ECLSS εφεδρεία, ρομποτική/actuation, edge/digital twin και ανθρώπινη ή επίγεια εποπτεία

Υποσύστημα	Περιγραφή	Ρόλος στο μοντέλο
Ζώνη φυτικής καλλιέργειας	Υδροπονικοί/αεροπονικοί ή άλλοι CEA θάλαμοι.	Παραγωγή φυτικής τροφής, plant-health monitoring, ελεγχόμενο μικροκλίμα.
PBR / BLSS κόμβος	Φωτοβιοαντιδραστήρες Limnospira/Chlorella ή άλλοι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί.	Παραγωγή O ₂ , κατανάλωση CO ₂ , βιομάζα, συμπληρωματική πρωτεΐνη.
ECLSS buffer	Φυσικοχημικό εφεδρικό υποσύστημα αέρα/νερού: Carbon Dioxide Removal Assembly (CDRA), Sabatier Reactor Assembly (SRA), Oxygen Generation Assembly (OGA) και φωτοκαταλυτική οξειδωση TiO ₂ /UV-C για VOCs και αιθυλένιο.	Απορροφά διακυμάνσεις του BLSS, αναλαμβάνει παραγωγή/καθαρισμό αέρα σε R4 emergency mode και αποτρέπει συσσώρευση CO ₂ , VOCs ή αιθυλενίου όταν οι βιολογικοί κύκλοι αποκλίνουν.
Ρομποτική και actuation	Αντλίες, βαλβίδες, LED, νεφελοποιητές, αερισμός, harvesting assistance.	Μετατροπή αποφάσεων σε φυσικές ενέργειες και fallback rule-based control.
Edge + Digital Twin	Τοπική επεξεργασία, expected-state engine, anomaly detection, confidence score.	Μείωση εξάρτησης από Γη και υποστήριξη αποφάσεων υπό time-delay.

Εικόνα 6-2 Υποσυστήματα Space Farm, ρόλος και βιβλιογραφική τεκμηρίωση

Κρίσιμο σημείο είναι ότι το ECLSS δεν είναι εξωτερικό ή ανταγωνιστικό προς το BLSS. Λειτουργεί ως buffer ασφαλείας. Σε κανονική λειτουργία το BLSS μειώνει τη μεταφερόμενη μάζα και ενισχύει την αυτάρκεια. Σε αστοχία ή βιολογική διακύμανση, το φυσικοχημικό ECLSS απορροφά την αστάθεια, ώστε να μη μεταφερθεί άμεσα στο πλήρωμα. Με αυτή την έννοια, το Space Farm δεν είναι αποκλειστικά βιολογικό σύστημα, αλλά υβριδική BLSS/ECLSS/IoST αρχιτεκτονική.

Στο παρόν μοντέλο, ο όρος ECLSS buffer δεν χρησιμοποιείται αφηρημένα. Αναφέρεται σε συγκεκριμένες φυσικοχημικές λειτουργίες: απομάκρυνση CO₂, αναγωγή CO₂ μέσω Sabatier, παραγωγή O₂ μέσω ηλεκτρόλυσης και απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων και αιθυλενίου μέσω φωτοκαταλυτικής οξείδωσης TiO₂/UV-C. Έτσι, το ECLSS λειτουργεί ως τεχνικό δίκτυ ασφαλείας που σταθεροποιεί την ατμόσφαιρα όταν το BLSS παρουσιάζει βιολογική καθυστέρηση, ταλάντωση ή προσωρινή απώλεια απόδοσης.

6.3 Βιολογική παραγωγική στρατηγική και χαρτοφυλάκιο οργανισμών

Η παραγωγική στρατηγική του Space Farm δεν πρέπει να βασίζεται σε μία μοναδική “βέλτιστη” καλλιέργεια. Το βιβλιογραφικό σώμα δείχνει ότι διαφορετικοί οργανισμοί καλύπτουν διαφορετικές λειτουργίες: τα ανώτερα φυτά παρέχουν φρέσκια τροφή και ψυχολογική αξία, οι μικροάλγες και τα κυανοβακτήρια υποστηρίζουν αναγέννηση αέρα και παραγωγή πρωτεϊνικής βιομάζας, ενώ τα BLSS διαμερίσματα αναλαμβάνουν ανακύκλωση θρεπτικών και μετατροπή αποβλήτων.

Το παραγωγικό μοντέλο δεν μπορεί να περιλαμβάνει μόνο οργανισμούς παραγωγής τροφής ή O₂. Για να υπάρξει πραγματική λειτουργική κλειστότητα, απαιτούνται και οργανισμοί ανακύκλωσης: αποικοδομητές που μετατρέπουν οργανικά απόβλητα και μη εδώδιμη βιομάζα σε ενδιάμεσες ροές, καθώς και νιτροποιητικά βακτήρια που μετατρέπουν αμμωνιακές μορφές αζώτου σε νιτρικά διαθέσιμα για τα φυτά. Χωρίς αυτά τα διαμερίσματα, το Space Farm θα παρέμενε σύστημα παραγωγής, όχι ολοκληρωμένο βιοαναγεννητικό σύστημα.

Κατηγορία	Λειτουργία	Ρόλος στο Space Farm
-----------	------------	----------------------

Φυλλώδη λαχανικά / μικρολαχανικά	Φρέσκια τροφή, ταχεία παραγωγή, ψυχολογική αξία, μη καταστροφική παρακολούθηση.	Θάλαμος φυτικής καλλιέργειας με οπτικό/υπερφασματικό monitoring.
Καρποφόρα φυτά	Ποικιλία διατροφής, βιταμίνες, υψηλή ψυχολογική αξία, αλλά μεγαλύτερος κύκλος.	Θάλαμος με μεγαλύτερη ανάγκη προγραμματισμού και sensing.
Σπόροι/δημητριακά/πρωτεϊνούχες καλλιέργειες	Θερμιδική και μακροθρεπτική συμπλήρωση, αλλά μεγαλύτερος χρόνος και ενεργειακό αποτύπωμα.	Στρατηγική κατηγορία, όχι αποκλειστική βάση του συστήματος.
Limnospira/Arthrospira	Air revitalization, βιομάζα, πρωτεΐνη, PBR monitoring.	PBR κόμβος BLSS με συνεχή παρακολούθηση pH, O ₂ /CO ₂ και βιομάζας.
Chlorella vulgaris	Υποψήφιος PBR οργανισμός για O ₂ /τροφή, με ζητήματα επεξεργασίας και πεπτικότητας.	Εναλλακτικός ή συμπληρωματικός PBR κόμβος, όχι μοναδική τροφή.
Bio-ISRU κυανοβακτήρια	Χρήση τοπικών πόρων, ρεγόλιθου, ατμόσφαιρας και συμπλήρωση απωλειών μάζας.	Μακροπρόθεσμη αντάρχεια και λειτουργική “κλειστότητα” με χρήση in situ πόρων.
Φωτοτετερότροφα και θερμόφιλα βακτήρια	Αποικοδόμηση οργανικών αποβλήτων, πτητικών λιπαρών οξέων και μη εδωδιμης βιομάζας· λειτουργικός ρόλος αντίστοιχος με τα Compartments 1–2 του MELiSSA.	Ανακυκλωτικός κόμβος που μετατρέπει απόβλητα σε ενδιάμεσες ροές θρεπτικών και αποτρέπει τη συσσώρευση οργανικού φορτίου.
Νιτροποιητικά βακτήρια	Οξείδωση αμμωνιακού αζώτου από ούρα ή αποικοδόμηση οργανικών αποβλήτων σε νιτρικά άλατα, με λειτουργικό ρόλο αντίστοιχο με Nitrosomonas/Nitrobacter στο Compartment 3.	Κλείσιμο του κύκλου αζώτου και παραγωγή θρεπτικής μορφής αζώτου για ανώτερα φυτά και φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς.

Πίνακας 6-2 Μοντέλο παραγωγής του Space Farm

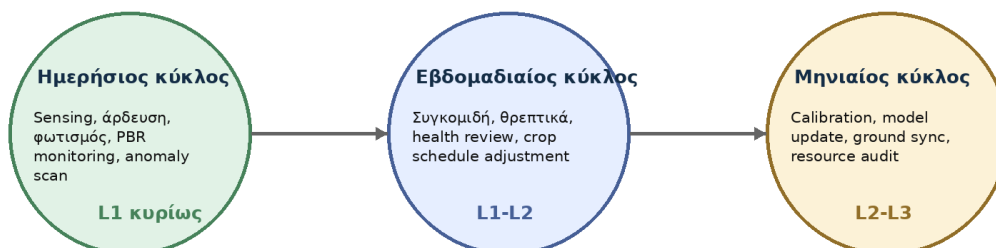
Το Space Farm, συνεπώς, δεν επιλέγει καλλιέργειες μόνο με βάση τη μέγιστη απόδοση ανά επιφάνεια. Επιλέγει συνδυασμό ρόλων: γρήγορη φρέσκια παραγωγή, μακροθρεπτική κάλυψη, ατμοσφαιρική αναγέννηση, διαχείριση θρεπτικών και ψυχολογική αποδοχή από το πλήρωμα. Αυτή η λογική είναι πιο συμβατή με μακροχρόνιες αποστολές από μια μονοκαλλιεργητική προσέγγιση.

6.4 Κύκλοι λειτουργίας και σχέση πληρώματος-συστήματος

Η επιχειρησιακή λειτουργία οργανώνεται σε ημερήσιο, εβδομαδιαίο και μηνιαίο κύκλο. Η διάκριση αυτή δεν είναι απλή διαχείριση προγράμματος. Αντιστοιχεί σε διαφορετικά επίπεδα αυτονομίας: ο ημερήσιος κύκλος πρέπει να είναι κατά το δυνατόν L1, ο εβδομαδιαίος συνήθως L1–L2, ενώ ο μηνιαίος κύκλος περιλαμβάνει βαθμονόμηση, αναθεώρηση μοντέλων και delayed ground sync. Αυτή η οργάνωση απαντά στο G1 και στο

G4, επειδή μετατρέπει το πλήρωμα από άμεσο χειριστή σε επιθεωρητή, επικυρωτή και διαχειριστή εξαιρέσεων.

Κύκλοι λειτουργίας Space Farm και επίπεδα αυτονομίας



Σχέση L1-L4 και R1-R4

Το L-layer αποφασίζει τη γεωπονική ενέργεια όταν τα δεδομένα είναι αξιόπιστα. Το R-layer λειτουργεί εγκάρσια ως ανεξάρτητο watchdog: αν εντοπίσει κρίσιμη αστοχία, κάνει override και μεταφέρει το σύστημα σε degraded ή safe mode.

Πίνακας 6-3 Κύκλοι λειτουργίας και σχέση L-layer/R-layer. Οι καθημερινές ενέργειες εκτελούνται κυρίως onboard, ενώ το resilience layer διατηρεί δικαίωμα override σε κρίσιμες αστοχίες.

Ημερήσιος	Sensing, logging, LED/άρδευση, PBR monitoring, anomaly scan.	L1 κυρίως. L2 όταν υπάρχει αβεβαιότητα ή ασυμφωνία αισθητήρων.	Το πλήρωμα βλέπει σύνοψη και παρεμβαίνει μόνο σε alerts.	G1, G2, G4
Εβδομαδιαίος	Crop health review, συγκομιδή, σπορά/μεταφύτευση, θρεπτικά, απογραφή αναλωσίμων.	L1-L2. Ρομπότ/actuators εκτελούν χαμηλού κινδύνου εργασίες, το πλήρωμα επικυρώνει κρίσιμες.	Το πλήρωμα λειτουργεί ως supervisor και όχι ως συνεχής χειριστής.	G4, G6
Μηνιαίος	Βαθμονόμηση, model update, Digital Twin recalibration, ground sync, resource audit.	L2-L3. Η Γη συμμετέχει σε μη επείγουσες αποφάσεις.	Η επίγεια ομάδα αναλύει reports χωρίς να εμποδίζει onboard λειτουργία.	G1, G5, G6
Έκτακτος	Sensor failure, actuator failure, contamination, PBR deviation, επικοινωνιακή απομόνωση.	R-layer override. L4 σημαίνει παράδοση ελέγχου στο resilience layer.	Το πλήρωμα εμπλέκεται όταν το σύστημα υποβαθμίζεται ή χρειάζεται φυσική επέμβαση.	G2, G3, G6

Πίνακας 6-4 Κύκλοι λειτουργίας, επίπεδα αυτονομίας και ρόλος πληρώματος

Δ

εν είναι ασφαλές να δηλωθεί, χωρίς κοινή πειραματική βάση, ότι το Space Farm μειώνει τον χρόνο πληρώματος κατά συγκεκριμένο ποσοστό σε σχέση με όλα τα ISS συστήματα. Η σωστή διατύπωση είναι ότι το μοντέλο στοχεύει σε μείωση του crew time μέσω αυτοματοποίησης ρουτίνας, τοπικής διάγνωσης και περιορισμού της ανθρώπινης εμπλοκής στα L2/L3 συμβάντα. Η ακριβής μείωση πρέπει να μετρηθεί σε αναλογική ή HiL δοκιμή.

6.5 Υβριδικό Digital Twin και λειτουργική χρήση του στο Space Farm

Το Digital Twin του Space Farm δεν πρέπει να ταυτιστεί με ένα μόνο data-driven μοντέλο. Η κριτική του Κεφαλαίου 5 έδειξε ότι η αποκλειστική εξάρτηση από μοντέλα τύπου Random Forest ή άλλα AI predictors κινδυνεύει να δημιουργήσει υπερπροσαρμογή σε γήινα δεδομένα. Για τον λόγο αυτό, το Space Farm υιοθετεί υβριδικό Digital Twin με τρεις πυλώνες: data-driven πρόβλεψη, μηχανιστική μοντελοποίηση PBR και μεταβολική/βιολογική ερμηνεία.

Πυλώνας	Λειτουργία	Ρόλος	Περιορισμός
Data-driven predictor	Πρόβλεψη βιομάζας, απόδοσης ή stress με βάση ιστορικά δεδομένα αισθητήρων.	Γρήγορη εκτίμηση τάσεων και απόκλισης.	Περιορισμένη γενίκευση σε νέα διαστημικά stress, ανάγκη recalibration.
Μηχανιστικό μοντέλο PBR	Μοντελοποίηση ανάπτυξης Limnospira και σχέσεων pH, CO ₂ , O ₂ , φωτός, βιομάζας.	Expected-state engine για PBR κόμβους και εντοπισμό φυσικοχημικών αποκλίσεων.	Χρειάζεται επικύρωση εκτός του πεδίου βαθμονόμησης, ειδικά σε ακραίο pH ή διαφορετική μεταφορά μάζας.
Μεταβολικό/βιολογικό μοντέλο	Αναπαράσταση μεταβολικών ροών, περιορισμών θρεπτικών και πιθανών μηχανισμών βλάβης.	Προσθέτει βιολογική ερμηνευσιμότητα στο confidence score.	Μπορεί να είναι ατελής ή να απαιτεί ειδικά omics/πειραματικά δεδομένα.
Anomaly model	Ανίχνευση αριθμητικών ανωμαλιών σε τηλεμετρία BLSS.	Resilience trigger για R1/R2 και ειδοποίηση πριν από αστοχία.	Χωρίς ground truth δεν εξηγεί πάντα αν η ανωμαλία είναι βιολογική, τεχνική ή ψευδώς θετική.

Πίνακας 6-5 Υβριδική δομή Digital Twin για Space Farm

Η χρήση του Digital Twin στον καθημερινό έλεγχο είναι διπλή. Πρώτον, παρέχει αναμενόμενες τιμές, ώστε οι αισθητήρες να ελέγχονται έναντι βιολογικά εύλογης συμπεριφοράς. Δεύτερον, υποστηρίζει what-if ανάλυση πριν από ενέργειες υψηλού κινδύνου, όπως αλλαγή φωτισμού PBR, μεταβολή CO₂, αύξηση θρεπτικών ή απομόνωση θαλάμου. Έτσι, το Digital Twin δεν αντικαθιστά το AI Decision Layer. Το τροφοδοτεί με φυσικοχημικά και βιολογικά όρια.

6.6 Σενάρια αστοχίας και fallback strategies

Η τεκμηρίωση σεναρίων αστοχίας είναι το σημείο όπου το εννοιολογικό μοντέλο διαφοροποιείται από απλή αρχιτεκτονική παρουσίαση. Το βιβλιογραφικό σώμα περιλαμβάνει τεχνικές anomaly detection και monitoring, αλλά δεν παρέχει ενιαίο πρωτόκολλο για αυτόνομη γεωργική λειτουργία υπό πολλαπλές αστοχίες. Το Space Farm οργανώνει τα σενάρια με βάση τη διάκριση L-layer/R-layer του Κεφαλαίου 5: το L-layer επιλέγει κανονικές γεωπονικές αποφάσεις, ενώ το R-layer λειτουργεί ως ανεξάρτητο watchdog που μπορεί να κάνει override όταν απειλείται η ασφάλεια, η καλλιέργεια ή το πλήρωμα.

Σενάριο	Ανίχνευση	Αντίδραση	Resilience
Αισθητήρας εκτός ορίων ή drift	Απόκλιση από φυσιολογικό εύρος, ασυμφωνία με γειτονικό αισθητήρα και Digital Twin.	Σήμανση δεδομένων ως suspect, cross-validation, χρήση backup ή model-based estimate.	R1: διόρθωση/υποβάθμιση δεδομένων.
Actuator failure	Ροή/πίεση/απόκριση ενεργοποιητή δεν ακολουθεί εντολή.	Μετάβαση σε εφεδρικό actuator ή rule-based safe setting.	R1–R2: απομόνωση υποσυστήματος.
Βιολογική απόκλιση PBR	Απόκλιση pH, O ₂ /CO ₂ , OD, φθορισμού ή βιομάζας από expected state.	Μείωση φορτίου, αλλαγή φωτισμού/ροής, alert πληρώματος, ECLSS buffer.	R2–R3: περιορισμός/υποβάθμιση PBR κόμβου.
Plant health anomaly	Υπερφασματική ή θερμική ένδειξη stress χωρίς άμεση βεβαιότητα αιτίας.	L2 επιβεβαίωση πληρώματος, οπτικός έλεγχος, συντηρητική επέμβαση σε υγρασία/αερισμό.	R2 αν επιβεβαιωθεί εξάπλωση.
Master edge node failure	Watchdog timeout, απουσία heartbeat, αδυναμία λήψης αποφάσεων.	Micro-edge nodes περνούν σε τοπικούς fallback controllers.	R3: degraded autonomous mode.
Διακοπή επικοινωνίας με Γη	Απουσία uplink/downlink για προκαθορισμένο διάστημα.	Συνέχιση L1 λειτουργιών, αποθήκευση telemetry, delayed sync.	R1 nominal εφόσον τα υποσυστήματα είναι σταθερά.

BLSS/ECLSS imbalance	Ασυμφωνία O ₂ /CO ₂ , νερού ή θρεπτικών μεταξύ βιολογικού και φυσικοχημικού συστήματος.	Ενεργοποίηση ECLSS buffer, περιορισμός βιολογικού φορτίου, alert πληρώματος.	R4 emergency buffer.
----------------------	---	--	----------------------

Πίνακας 6-6 Σενάρια αστοχίας και στρατηγικές fallback του Space Farm

6.7 Ενεργειακή και πόρων διαχείριση

Το ενεργειακό ισοζύγιο της προηγούμενης εκδοχής παρουσίαζε συγκεκριμένη παραγωγή και κατανάλωση ισχύος ως εάν αποτελούσε τελική προδιαγραφή. Αυτό είναι μεθοδολογικά ευάλωτο, γιατί το βιβλιογραφικό σώμα παρέχει τεχνικές αρχές και επιμέρους τιμές, όχι ολοκληρωμένο ενεργειακό σύνολο για το συγκεκριμένο Space Farm. Η αναθεωρημένη προσέγγιση αντιμετωπίζει την ενέργεια ως σύνολο σχεδιαστικών μεταβλητών που πρέπει να βελτιστοποιηθούν και να μετρηθούν σε μελλοντική επικύρωση.

Για διαστημικό σχεδιασμό, η ενέργεια δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο ως kWh/kg εδώδιμης βιομάζας. Η βασική συνθετική μετρική είναι η Ισοδύναμη Μάζα Συστήματος (Equivalent System Mass - ESM), επειδή μεταφράζει κατανάλωση ισχύος, ανάγκες ψύξης, όγκο, μάζα εξοπλισμού, αναλώσιμα και χρόνο πληρώματος σε συγκρίσιμη ισοδύναμη μάζα που πρέπει να εκτοξευθεί ή να υποστηριχθεί. Επομένως, ο ρόλος του Digital Twin στη διαχείριση πόρων δεν είναι μόνο να μειώνει την κατανάλωση LED, αλλά να ελαχιστοποιεί το συνολικό ESM του Space Farm σε βάθος αποστολής.

Η βιβλιογραφία υποδεικνύει όπως είπαμε τρεις ισχυρές ενεργειακές πιέσεις: φωτισμός LED για ανώτερα φυτά, φωτισμός και ανάμειξη/κυκλοφορία σε PBR, και φυσικοχημική υποστήριξη μέσω ECLSS. Παράλληλα, αναδεικνύει τεχνικές βελτίωσης: επιλογή φάσματος φωτισμού, χρονοδρομολόγηση καλλιεργειών, βελτιστοποίηση PBR γεωμετρίας, αποφυγή υπερβολικής ανάδευσης, τοπική επεξεργασία για μείωση τηλεμετρίας και ανάκτηση θερμότητας όπου είναι διαθέσιμη.

Πεδίο	Κρίσιμες μεταβλητές	Στρατηγική Space Farm	Μελλοντική μέτρηση
LED φωτισμός φυτών	Ένταση, φάσμα, φωτοπερίοδος, stage-specific recipes.	Δυναμική ρύθμιση ανά είδος/στάδιο και αποφυγή ταυτόχρονων peaks.	Πειραματική μέτρηση kWh/kg εδώδιμης βιομάζας και μετατροπή σε συνιστώσα ESM μέσω ισχύος, ψύξης και hardware mass.

PBR φωτισμός και κυκλοφορία	Φωτεινή ένταση, οπτική διαδρομή, self-shading, mixing, gas exchange.	Digital Twin υπολογίζει expected O ₂ /CO ₂ και προσαρμόζει φωτισμό/ροή.	Δοκιμές κλιμάκωσης PBR, fouling, harvesting και θερμική σταθερότητα.
Edge AI και δίκτυο	Υπολογιστικό φορτίο, inference frequency, task offloading, telemetry volume.	Onboard-first επεξεργασία για μείωση bandwidth και latency dependence.	HiL μέτρηση κατανάλωσης micro-edge nodes και master edge.
ECLSS buffer	Φυσικοχημική υποστήριξη αέρα/νερού και emergency operation.	Ενεργοποίηση όταν το BLSS αποκλίνει ή χρειάζεται απορρόφηση διακυμάνσεων.	Μετρήσεις αλληλεπίδρασης BLSS/ECLSS σε κλειστό βρόχο.
Θερμική διαχείριση	Θερμότητα LED, PBR και ηλεκτρονικών.	Ανάκτηση/αναδιανομή θερμότητας όπου είναι εφικτό.	Θερμική προσομοίωση και HiL δοκιμή.
Equivalent System Mass (ESM)	Ισχύς, μάζα εξοπλισμού, όγκος, ψύξη, αναλώσιμα, χρόνος πληρώματος και απαιτήσεις συντήρησης.	Κεντρική μετρική βελτιστοποίησης του Digital Twin: κάθε ενεργειακή ή λειτουργική επιλογή αξιολογείται ως επίδραση στο συνολικό ESM, όχι μόνο ως στιγμιαία κατανάλωση.	Υπολογισμός ESM σε SiL/HiL και αναλογικό πρωτότυπο με σενάρια αποστολής Σελήνης/Άρη.

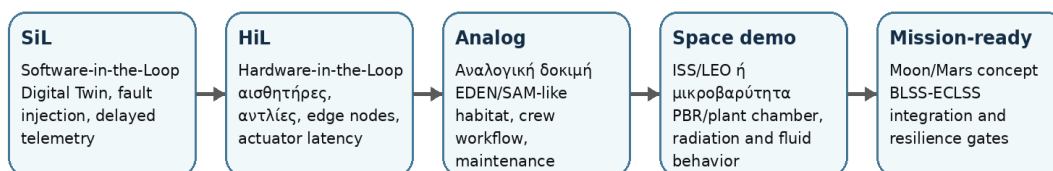
Πίνακας 6-7 Ενεργειακές μεταβλητές σχεδιασμού και απαιτήσεις επικύρωσης

6.8 Διαδρομή επικύρωσης: SiL, HiL, αναλογική δοκιμή και διαστημική επίδειξη

Η προηγούμενη ενότητα 4.3 εισήγαγε τις έννοιες SiL και HiL ως αναγκαία στάδια πριν από διαστημική δοκιμή. Το Κεφάλαιο 6 τις ενσωματώνει ρητά στο εννοιολογικό μοντέλο. Η μετάβαση από βιβλιογραφικά τεκμηριωμένη αρχιτεκτονική σε λειτουργικό Space Farm δεν μπορεί να γίνει απευθείας. Απαιτείται διαδοχική επικύρωση, επειδή κάθε στάδιο ελέγχει διαφορετικό είδος κινδύνου: λογική απόφασης, φυσική απόκριση ενεργοποιητών, ανθρώπινο φόρτο, βιολογική σταθερότητα και συμπεριφορά υπό καθυστέρηση επικοινωνίας.

Η διαδρομή επικύρωσης πρέπει να διαχωρίζει αυστηρά το περιβάλλον μικροβαρύτητας από το περιβάλλον μερικής βαρύτητας. Ο ISS/LEO έλεγχος είναι κρίσιμος για την πλήρη απουσία άνωσης, τη διαχείριση φυσαλίδων και τη χρήση μεμβρανών σε PBR, αλλά δεν ταυτίζεται με τις συνθήκες επιφάνειας Σελήνης ή Άρη, όπου η βαρύτητα 0,16g ή 0,38g επιτρέπει μερική καθίζηση, διαφορετική κατανομή υγρών και διαφορετική συμπεριφορά υδροπονίας/ομιχλοπονίας. Συνεπώς, το τελικό validation pathway απαιτεί δύο ξεχωριστά στάδια: ISS/LEO demo για microgravity και Lunar/Martian surface demo για partial gravity.

Διαδρομή επικύρωσης Space Farm: από μοντέλο σε αποστολή



Validation gates

Κάθε στάδιο πρέπει να ενεργοποιεί gates αξιοπιστίας: data quality, biological validity, actuator safety, crew workload και δυνατότητα επιστροφής σε ασφαλή λειτουργία.

Πίνακας 6-8 Προτεινόμενη διαδρομή επικύρωσης του Space Farm. Η SiL/HiL προσέγγιση προηγείται της αναλογικής και διαστημικής δοκιμής, ώστε να ελεγχθούν decisions, actuators, resilience και crew workflow πριν από ακριβότερη επικύρωση

Στάδιο	Τι ελέγχει	Κίνδυνος που μειώνει	Ενδεικτικές μετρικές
SiL - Software-in-the-Loop	Digital Twin, L1–L4, R1–R4, delayed telemetry, fault injection.	Ψευδώς θετικές αποφάσεις, λανθασμένο routing, αστοχία confidence score.	Simulation logs, decision accuracy, false alarms, safe-mode triggers.
HiL - Hardware-in-the-Loop	Αισθητήρες, αντλίες, LED, micro-edge, network gateway.	Latency actuators, αισθητήρια drift, power peaks, network dropout.	End-to-end response time, sensor-health score, actuator success rate.
Αναλογική δοκιμή	EDEN/SAM-like habitat, πραγματικές καλλιέργειες, crew workflow.	Crew time, maintenance, contamination, human-machine interaction.	Crew workload, crop stability, intervention frequency.
PBR/BLSS pilot	Limnospira/Chlorella PBR, ECLSS buffer, mass-flow monitoring.	Biofouling, gas exchange, harvesting, biological drift.	O ₂ /CO ₂ balance, biomass, stability over weeks/months.
ISS/LEO Demo (microgravity)	Πλήρης απουσία άνωσης, συσσώρευση φυσαλίδων, gas-liquid separation, χρήση	Αποτυχία PBR/υδροπονικών ρευστών λόγω μικροβαρύτητας, bubbles,	Fluid containment, membrane performance, bubble management, O ₂ /CO ₂ exchange, remote recovery.

	μεμβρανών και απομακρυσμένη λειτουργία σε 0g.	radiation και μη ελεγχόμενη μεταφορά μάζας.	
Lunar/Martian Surface Demo (partial gravity)	Συμπεριφορά ρευστών σε 0,16g/0,38g, υδροπονία/ομιχλοπονία, sedimentation, κατανομή ομίχλης και λειτουργία ενεργοποιητών σε επιφάνεια Σελήνης ή Άρη.	Εσφαλμένη μεταφορά συμπερασμάτων από ISS 0g σε περιβάλλον μερικής βαρύτητας· διαφορετική άρδευση, gas exchange και κατανομή θρεπτικών.	Crop stability, fluid distribution, fog/aerosol behavior, root-zone moisture, actuator reliability under partial gravity.

Πίνακας 6-9 Στάδια επικύρωσης Space Farm και μετρικές ελέγχου

Η διαδρομή αυτή προστατεύει την εργασία από υπερβολική αξίωση επιχειρησιακής ετοιμότητας. Το Space Farm δεν παρουσιάζεται ως έτοιμο TRL-9 σύστημα, αλλά ως αρχιτεκτονικό μοντέλο που μετατρέπεται σε ελέγξιμο ερευνητικό πρόγραμμα. Αυτό είναι κρίσιμο, επειδή το βιβλιογραφικό σώμα δείχνει υψηλή ωριμότητα σε επιμέρους στοιχεία αλλά όχι σε ολοκληρωμένη, αυτόνομη, ανθεκτική και BLSS/ECLSS-integrated διαστημική γεωργική μονάδα.

6.9 Ολοκληρωμένη σύνθεση

Το Κεφάλαιο 6 μετατρέπει την IoST-SPA αρχιτεκτονική του Κεφαλαίου 5 σε λειτουργικό εννοιολογικό μοντέλο Space Farm. Η κεντρική συμβολή δεν είναι η πρόταση ενός ακόμη θερμοκηπίου, ούτε η αυθαίρετη επιλογή μιας “ιδανικής” καλλιέργειας. Η συμβολή είναι η οργάνωση ενός συστήματος στο οποίο οι βιολογικοί κόμβοι, οι αισθητήρες, οι ενεργοποιητές, το Digital Twin, το AI Decision Layer, το Resilience Layer, το ECLSS buffer και το πλήρωμα έχουν ρητά καθορισμένους ρόλους.

Φυσική διάταξη	Αρθρωτές ζώνες καλλιέργειας, PBR/BLSS, ECLSS buffer, edge control και ρομποτική.	Απαντά στο G3, G4 και G6.
Παραγωγικό χαρτοφυλάκιο	Συνδυασμός φυτών, μικροαλγών/κυανοβακτηρίων, αποικοδομητών, νιτροποιητικών βακτηρίων και BLSS κόμβων.	Αποφεύγει τη μονοκαλλιέργεια και συνδέει παραγωγή τροφής, αναγέννηση αέρα και ανακύκλωση αποβλήτων/αζώτου.
Κύκλοι λειτουργίας	Ημερήσιος, εβδομαδιαίος, μηνιαίος και έκτακτος κύκλος.	Μετατρέπει το πλήρωμα από χειριστή σε επιθεωρητή.
Υβριδικό Digital Twin	Data-driven, μηχανιστικό, μεταβολικό και anomaly-detection επίπεδο.	Απαντά στο G5 και μειώνει το ρίσκο AI overfitting.

Fallback/resilience	Σενάρια αισθητήρων, ενεργοποιητών, PBR, plant health, edge, communication και BLSS/ECLSS.	Μετατρέπει την ανθεκτικότητα από γενική αρχή σε ελέγξιμο πρωτόκολλο.
Validation pathway	SiL, HiL, analog, PBR/BLSS pilot, ISS/LEO microgravity demo και Lunar/Martian partial-gravity demo.	Μετατρέπει το μοντέλο σε μελλοντικό ερευνητικό πρόγραμμα με ρητή διάκριση 0g και partial gravity.
Διαχείριση πόρων / ESM	Ενέργεια, θερμική διαχείριση, μάζα, όγκος, αναλώσιμα και χρόνος πληρώματος αξιολογούνται μέσω Equivalent System Mass.	Μετατρέπει την ενεργειακή διαχείριση από απλό kWh/kg σε διαστημική μετρική βιωσιμότητας.

Πίνακας 6-10 Τελική σύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου Space Farm

Συνεπώς, το Space Farm αποτελεί τεκμηριωμένη απάντηση στα κενά G1–G6, αλλά όχι απόδειξη ότι τα κενά έχουν ήδη λυθεί πειραματικά. Η διάκριση αυτή είναι ουσιώδης: το Κεφάλαιο 6 ορίζει το σύστημα που πρέπει να κατασκευαστεί, να δοκιμαστεί και να επικυρωθεί. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία καταλήγει σε ένα σαφές ερευνητικό προϊόν: ένα λειτουργικό, ελέγξιμο και βιβλιογραφικά τεκμηριωμένο εννοιολογικό μοντέλο για αυτόνομη διαστημική γεωργία ακριβείας.

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Το παρόν κεφάλαιο κλείνει την εργασία χωρίς να επαναλαμβάνει μηχανικά τα προηγούμενα κεφάλαια. Συνθέτει τα ευρήματα της συστηματικής ανασκόπησης, της συγκριτικής αξιολόγησης, της προτεινόμενης IoST-SPA αρχιτεκτονικής και του εννοιολογικού μοντέλου Space Farm. Το ερώτημα που διατρέχει την εργασία παραμένει πρακτικό: πώς μπορεί να σχεδιαστεί ένα σύστημα διαστημικής γεωργίας που να λειτουργεί με περιορισμένη ανθρώπινη παρέμβαση, σε συνθήκες καθυστέρησης επικοινωνίας, περιορισμένης ενέργειας και βιολογικής αβεβαιότητας; Η απάντηση δεν είναι ένα μεμονωμένο θερμοκήπιο. Είναι μια αρχιτεκτονική σύνθεση.

Η εργασία στηρίχθηκε στο τελικό βιβλιογραφικό σώμα των 127 συμπεριληφθεισών δημοσιεύσεων και οργανώθηκε σε τέσσερις άξονες. Ο Άξονας A1 έδειξε τη βιολογική και βιοαναγεννητική βάση του πεδίου. Ο Άξονας A2 ανέδειξε τις τεχνολογίες IoST, AI, edge/cloud και αυτόνομου ελέγχου. Ο Άξονας A3 λειτούργησε ως γέφυρα από τη γήινη γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος προς το διάστημα. Ο Άξονας A4 έδωσε τον ιστορικό και στρατηγικό οδικό χάρτη. Από αυτή τη σύνθεση προέκυψε η ανάγκη για ένα ενιαίο πλαίσιο Space Precision Agriculture, όχι ως ώριμη διαστημική εγκατάσταση, αλλά ως τεκμηριωμένο αρχιτεκτονικό πρότυπο.

7.1 Κύρια συμπεράσματα της εργασίας

Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι η διαστημική γεωργία δεν πάσχει από πλήρη έλλειψη επιμέρους τεχνολογιών. Υπάρχουν φυτοθάλαμοι, υδροπονικές και αεροπονικές προσεγγίσεις, φωτοβιοαντιδραστήρες, αισθητήρες φυτικής υγείας, συστήματα αναλογικών αποστολών και εργαλεία ανάλυσης δεδομένων. Το κενό βρίσκεται αλλού. Βρίσκεται στη μεταξύ τους σύνδεση.

Το Κεφάλαιο 3 έδειξε ότι η βιολογική βάση του πεδίου είναι ισχυρή αλλά άνιση. Η *Limnospira*/*Arthrospira* και η *Chlorella* διαθέτουν σαφές δυναμικό για παραγωγή οξυγόνου και βιομάζας, ενώ κυανοβακτήρια όπως *Anabaena*, *Nostoc* και *Chroococcidiopsis* συνδέονται με σενάρια βιολογικής ISRU. Παρ' όλα αυτά, η μετάβαση από εργαστηριακά ή πιλοτικά αποτελέσματα σε επιχειρησιακή χρήση παραμένει περιορισμένη. Δεν είναι σαφές, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, πώς θα συμπεριφερθούν μακροχρόνια οι ίδιοι οργανισμοί σε ολοκληρωμένο σεληνιακό ή αρεϊκό περιβάλλον, όπου θα συνυπάρχουν ακτινοβολία,

χαμηλή ή μερική βαρύτητα, περιορισμένη συντήρηση, biofouling και μεταβαλλόμενη ποιότητα ροών μάζας.

Το δεύτερο συμπέρασμα αφορά την αυτονομία. Τα υπάρχοντα συστήματα έχουν προχωρήσει σημαντικά στην παρακολούθηση και στον αυτοματισμό, αλλά δεν έχουν φτάσει σε πλήρη onboard decision-making. Η διάκριση είναι κρίσιμη. Ένα σύστημα που μετρά θερμοκρασία, υγρασία, CO₂ ή φασματικούς δείκτες δεν είναι απαραίτητα αυτόνομο· αυτόνομο γίνεται όταν μπορεί να ερμηνεύσει την απόκλιση, να επιλέξει ενέργεια, να ελέγξει το ρίσκο και να λειτουργήσει χωρίς άμεση επίγεια παρέμβαση. Εδώ εντοπίζεται το κενό G1 του Κεφαλαίου 4.

Το τρίτο συμπέρασμα είναι ότι τα BLSS και τα ECLSS δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως αντίπαλες τεχνολογικές κατηγορίες. Η βιολογική υποστήριξη ζωής προσφέρει ανακύκλωση μάζας, παραγωγή τροφής και δυνατότητα μακροχρόνιας αυτάρκειας. Τα φυσικοχημικά ECLSS παραμένουν αναγκαία ως buffer, εφεδρεία και μηχανισμός άμεσης σταθεροποίησης. Η εργασία κατέληξε σε υβριδική λογική: το BLSS αναλαμβάνει τη μακροχρόνια βιολογική λειτουργία, ενώ το ECLSS διατηρεί όρια ασφαλείας όταν η βιολογία καθυστερεί, αποκλίνει ή αστοχεί.

Το τέταρτο συμπέρασμα συνδέεται με την αρχιτεκτονική IoST-SPA του Κεφαλαίου 5. Η προτεινόμενη δομή Sensing and Actuation, Data Fusion and Validation, Networking, Edge Computing/Digital Twin, AI Decision Layer, BLSS Integration Interface και Resilience Layers δεν προστίθεται ως απλή τεχνική διακόσμηση. Απαντά στα κενά που τεκμηριώθηκαν στα Κεφάλαια 3 και 4. Οι αισθητήρες χωρίς αξιολόγηση μετρήσεων παράγουν αβέβαια δεδομένα. Το cloud χωρίς edge processing δημιουργεί εξάρτηση από επικοινωνία. Το AI χωρίς βιολογικούς κανόνες οδηγεί σε μαύρο κουτί. Το BLSS χωρίς resilience γίνεται εύθραυστο.

Το πέμπτο συμπέρασμα αφορά το Κεφάλαιο 6. Το Space Farm δεν παρουσιάστηκε ως έτοιμο μηχανολογικό σχέδιο, αλλά ως λειτουργικό εννοιολογικό μοντέλο. Αυτό είναι σημαντικό. Η εργασία δεν απέδειξε πειραματικά ότι ένα τέτοιο σύστημα θα λειτουργήσει στον Άρη· αυτό θα ήταν υπερβολικός ισχυρισμός. Έδειξε όμως πώς μπορούν να οργανωθούν φυσική διάταξη, βιολογικό χαρτοφυλάκιο, υβριδικό Digital Twin, κύκλοι λειτουργίας, fallback strategies, ECLSS buffer και διαδρομή επικύρωσης.

Πεδίο	Τι τεκμηριώθηκε	Τι παραμένει ανοιχτό
Βιολογική βάση	Μικροφύκη, κυανοβακτήρια, ανώτερα φυτά και αποικοδομητές μπορούν να υποστηρίξουν επιμέρους λειτουργίες BLSS.	Μακροχρόνια σταθερότητα σε πραγματικές σεληνιακές/αρεϊκές συνθήκες.
Τεχνολογική βάση	Υπάρχουν sensing, cloud/edge, AI, anomaly detection και digital twin προσεγγίσεις.	Ενιαία space-qualified λειτουργία με ακτινοβολία, καθυστέρηση και περιορισμένη συντήρηση.
Συγκριτική αξιολόγηση	Τα C1–C6 και G1–G6 δίνουν κοινή γλώσσα για σύγκριση συστημάτων.	Η βαθμολόγηση παραμένει ποιοτική και χρειάζεται πειραματική επαλήθευση.
Προτεινόμενη αρχιτεκτονική	Η IoST-SPA δομή συνδέει αισθητήρες, edge, AI, BLSS και resilience.	Απαιτείται SiL/HiL και αναλογική δοκιμή πριν από διαστημική επίδειξη.
Space Farm μοντέλο	Το μοντέλο οργανώνει λειτουργικά υποσυστήματα, βιολογία, απόφαση και fallback.	Δεν έχει ακόμη υλοποιηθεί ως ολοκληρωμένο πρωτότυπο.

Πίνακας 7-1 Συνθετική αποτύπωση των κύριων συμπερασμάτων

7.2 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

Τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας απαντώνται πλέον όχι ως ανεξάρτητες απαντήσεις, αλλά ως αλληλουχία. Τα πρώτα ερωτήματα χαρτογραφούν το πεδίο. Τα επόμενα εντοπίζουν τους περιορισμούς. Τα τελευταία μετατρέπουν τους περιορισμούς σε αρχιτεκτονική απαίτηση.

Ερευνητικό ερώτημα	Συμπυκνωμένη απάντηση	Κύρια σύνδεση
EE1: Τεχνολογικές λύσεις σε ISS/αναλογικά συστήματα	Τα συστήματα VEGGIE, APH-like plant chambers, EDEN ISS, PBR και αναλογικές πλατφόρμες παρέχουν τεκμηριωμένη βάση για καλλιέργεια, sensing και ελεγχόμενο περιβάλλον, όχι όμως πλήρη αυτονομία.	Κεφ. 3–4
EE2: Ρόλος μικροφυκών και PBR	Οι φωτοβιοαντιδραστήρες και οι μικροάλγες λειτουργούν ως βασικοί υποψήφιοι κόμβοι για O ₂ , CO ₂ , βιομάζα και ανακύκλωση, αλλά χρειάζονται harvesting, monitoring και integration με ECLSS.	Κεφ. 3, 5, 6
EE3: Ρομποτική και αυτοματισμός	Η ρομποτική παραμένει περισσότερο σχεδιαστική απαίτηση παρά ώριμη διαστημική πρακτική για πλήρη κύκλο καλλιέργειας, συντήρησης και συγκομιδής.	Κεφ. 4, 6

EE4: Παράμετροι που διαφοροποιούν SPA από γήινη CEA	Μικροβαρύτητα/μερική βαρύτητα, ακτινοβολία, καθυστέρηση επικοινωνίας, περιορισμένη συντήρηση, μάζα, όγκος και ενέργεια αλλάζουν ριζικά τον σχεδιασμό.	Κεφ. 3–6
EE5: Μη λειτουργικές απαιτήσεις IoST	Το IoST stack χρειάζεται ανθεκτικό sensing, onboard-first επεξεργασία, DTN/store-and-forward λογική, validation σήματος και fallback modes.	Κεφ. 5
EE6: Αρχιτεκτονική επιπέδων για αυτόνομη απόφαση	Η τετραεπίπεδη λογική sensing–networking–edge–AI επεκτάθηκε σε ολοκληρωμένη IoST-SPA αρχιτεκτονική με data validation, BLSS interface και resilience.	Κεφ. 5
EE7: AI/ML για πρόβλεψη και βελτιστοποίηση	Χρειάζεται υβριδική προσέγγιση: data-driven μοντέλα, μηχανιστικά/μεταβολικά μοντέλα, anomaly detection και εξηγήσιμη απόφαση. Δεν επαρκεί ένα μόνο μοντέλο.	Κεφ. 4–6
EE8: Βαθμός αυτονομίας και τεχνολογικά κενά	Η σύγκριση C1–C6 ανέδειξε ότι τα υπάρχοντα συστήματα έχουν επιμέρους ωριμότητα, αλλά υστερούν σε onboard autonomy, fault tolerance και ενιαία BLSS/IoST ολοκλήρωση.	Κεφ. 4
EE9: Ανθεκτικότητα και ανάκαμψη	Τα R1–R4 λειτουργούν ως ανεξάρτητη λογική ανθεκτικότητας: ανίχνευση, εφεδρεία, safe mode και emergency handover. Η επιχειρησιακή τους αξία πρέπει να δοκιμαστεί.	Κεφ. 5–6

Πίνακας 7-2 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα και σύνδεση με τα κεφάλαια

7.3 Συνεισφορά της εργασίας

7.3.1 Θεωρητική συνεισφορά

Η πρώτη θεωρητική συνεισφορά είναι η οργάνωση του πεδίου σε συνεκτική ακολουθία: βιβλιογραφικό σώμα, τέσσερις άξονες, συγκριτικά κριτήρια C1–C6, τεχνολογικά κενά G1–G6, αρχιτεκτονικές απαιτήσεις και εννοιολογικό μοντέλο. Η εργασία δεν περιορίστηκε σε περιγραφή συστημάτων. Τα μετέτρεψε σε σχεδιαστικές μεταβλητές.

Η δεύτερη συνεισφορά είναι το πλαίσιο ποιοτικής αξιολόγησης C1–C6. Τα κριτήρια αυτονομίας, sensing, κλειστού βρόχου, ενεργειακής απόδοσης, ανοχής σε αστοχίες και επεκτασιμότητας επιτρέπουν συγκρίσεις μεταξύ ετερογενών συστημάτων. Η βαθμολόγηση δεν είναι μέτρηση κοινής πειραματικής καμπάνιας. Είναι ποιοτική κανονικοποίηση. Αυτή η διάκριση κρατά την αξιολόγηση έντιμη.

Η τρίτη συνεισφορά είναι η διατύπωση της IoST-SPA αρχιτεκτονικής. Η εργασία προτείνει ένα layered framework όπου οι αισθητήρες δεν λειτουργούν ως απλές πηγές δεδομένων, αλλά ως μέρος ενός μηχανισμού βιολογικής ερμηνείας, edge επεξεργασίας, confidence-

based απόφασης και ελέγχου ανθεκτικότητας. Πώς αλλιώς μπορεί να υπάρξει αυτονομία όταν η Γη δεν μπορεί να απαντήσει εγκαίρως;

Η τέταρτη θεωρητική συνεισφορά είναι η BLSS Integration Interface. Η έννοια αυτή μετατρέπει τα βιολογικά υποσυστήματα σε addressable λειτουργικούς κόμβους, δηλαδή σε στοιχεία που μπορούν να παρακολουθούνται, να αξιολογούνται και να εντάσσονται σε ενιαίο κύκλο αποφάσεων. Η βιολογία δεν γίνεται απλώς “δεδομένο”. Γίνεται μέρος της αρχιτεκτονικής.

7.3.2 Πρακτική συνεισφορά

Η πρακτική συνεισφορά βρίσκεται κυρίως στη χρήση του πλαισίου ως οδηγού σχεδιασμού. Ένας ερευνητής μπορεί να χρησιμοποιήσει τα G1–G6 για να εντοπίσει αν το σύστημά του απαντά σε πραγματικό αρχιτεκτονικό κενό ή αν προσθέτει ακόμη μία μεμονωμένη τεχνολογία. Ένας μηχανικός μπορεί να χρησιμοποιήσει τα επίπεδα του Κεφαλαίου 5 για να οργανώσει sensing, networking, edge, AI και resilience. Ένας σχεδιαστής αναλογικής αποστολής μπορεί να χρησιμοποιήσει το validation pathway του Κεφαλαίου 6 για να περάσει από SiL και HiL σε αναλογικό πεδίο.

Η εργασία προσφέρει επίσης ελληνόγλωσση συνθετική βάση για ένα πεδίο που συνήθως εμφανίζεται κατακερματισμένο ανάμεσα σε space biology, IoT, AI, CEA και life-support engineering. Αυτό μου φαίνεται ιδιαίτερα σημαντικό, επειδή η διαστημική γεωργία δεν ανήκει σε ένα μόνο γνωστικό αντικείμενο. Χρειάζεται γλώσσα που να αντέχει τη βιολογική αβεβαιότητα και την τεχνική αυστηρότητα.

7.3.3 Περιορισμοί της εργασίας

Ο πρώτος περιορισμός αφορά τη μεθοδολογία. Η εργασία βασίστηκε σε συστηματική ανασκόπηση με συγκεκριμένα σχήματα αναζήτησης και κριτήρια συμπερίληψης. Αυτό προσφέρει διαφάνεια, αλλά δεν εξαντλεί ολόκληρο το πεδίο. Δημοσιεύσεις εκτός Scopus, τεχνικές αναφορές οργανισμών, μη αγγλόγλωσση βιβλιογραφία ή εσωτερικά δεδομένα αποστολών μπορεί να μην έχουν συμπεριληφθεί. Άρα το τελικό βιβλιογραφικό σώμα των 127 δημοσιεύσεων είναι συνεπές με τη μέθοδο, όχι απόλυτη αναπαράσταση όλης της παγκόσμιας γνώσης.

Ο δεύτερος περιορισμός αφορά τη φύση της συγκριτικής αξιολόγησης. Τα C1–C6 δεν προέκυψαν από κοινό πείραμα στο οποίο όλα τα συστήματα δοκιμάστηκαν στις ίδιες

συνθήκες. Προέκυψαν από ποιοτική ανάγνωση τεκμηρίων διαφορετικής ωριμότητας: ISS πειράματα, αναλογικές εγκαταστάσεις, εργαστηριακοί PBR, concept papers, digital twin μελέτες και IoT prototypes. Δεν είναι σαφές ότι οι αριθμητικές βαθμολογίες μπορούν να μεταφερθούν αυτούσιες σε επιχειρησιακό σχεδιασμό. Μπορούν όμως να λειτουργήσουν ως συγκριτικός χάρτης.

Ο τρίτος περιορισμός αφορά την προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Η IoST-SPA δομή δεν έχει κατασκευαστεί ως πλήρες σύστημα. Δεν έχει δοκιμαστεί σε διαστημική ακτινοβολία, πραγματική καθυστέρηση Mars communication, μικροβαρύτητα, μερική βαρύτητα ή μακροχρόνια βιολογική λειτουργία. Η εργασία, επομένως, δεν αποδεικνύει επιχειρησιακή ετοιμότητα. Προτείνει ελεγχόμενη διαδρομή προς αυτήν.

Ο τέταρτος περιορισμός είναι βιολογικός. Τα BLSS δεν είναι μηχανές με άμεση και πλήρως προβλέψιμη απόκριση. Έχουν αδράνεια, drift, επιμολύνσεις, μεταβολική προσαρμογή και εξάρτηση από μικρές μεταβολές φωτός, θρεπτικών και ροών αερίου. Η καθαρά αισιόδοξη ανάγνωση των PBR και bio-ISRU αποτελεσμάτων δεν με πείθει πλήρως όταν αποκόπτεται από αυτά τα όρια.

Ο πέμπτος περιορισμός αφορά το Digital Twin. Στην εργασία προτείνεται υβριδική λογική, δηλαδή συνδυασμός data-driven, μηχανιστικών και μεταβολικών μοντέλων. Αυτό είναι λογικό, αλλά απαιτητικό. Χωρίς συνεχή βαθμονόμηση από πραγματικά δεδομένα, ένα digital twin κινδυνεύει να γίνει καλά δομημένη υπόθεση — όχι αξιόπιστος επιχειρησιακός δίδυμος.

7.4 Κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Η μελλοντική έρευνα πρέπει να κινηθεί σε στάδια. Όχι όλα μαζί. Πρώτα χρειάζεται να ελεγχθεί αν τα επιμέρους επίπεδα της αρχιτεκτονικής λειτουργούν με σταθερότητα σε ελεγχόμενες συνθήκες. Έπειτα πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους. Μόνο μετά έχει νόημα η αναλογική ή διαστημική επίδειξη.

Προτεραιότητα	Κατεύθυνση	Στόχος
Υψηλή	SiL/HiL επικύρωση της IoST-SPA αρχιτεκτονικής	Έλεγχος των ροών sensing–edge–AI–actuation πριν από βιολογική ή αναλογική δοκιμή.

Υψηλή	Space-qualified sensing για CEA και PBR	Αξιολόγηση αισθητήρων pH, EC, DO, CO ₂ , εικόνας και φασματικών μετρήσεων υπό θόρυβο, drift και ακτινοβολία.
Υψηλή	Υβριδικό Digital Twin με βιολογική ερμηνευσιμότητα	Σύνδεση μηχανιστικών μοντέλων PBR, μεταβολικών μοντέλων και data-driven προβλέψεων.
Μεσαία	Αναλογική δοκιμή BLSS/IoST σε κλειστό θάλαμο	Έλεγχος μακροχρόνιας λειτουργίας με φυτά, μικροάλγες, αποικοδομητές και ECLSS buffer.
Μεσαία	Αυτόνομη ρομποτική για crew-time reduction	Δοκιμή κύκλων επιθεώρησης, μικροχειρισμών, δειγματοληψίας, συγκομιδής και καθαρισμού.
Μεσαία	Validation των R1–R4 resilience layers	Πειράματα αστοχίας: απώλεια αισθητήρα, drift μοντέλου, διακοπή επικοινωνίας, PBR contamination.
Μακροπρόθεσμη	LEO ή lunar surface demonstrator	Σταδιακή διαστημική επίδειξη, πρώτα σε μικροβαρύτητα/LEO και αργότερα σε μερική βαρύτητα.

Πίνακας 7-3 Προτεινόμενες κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας.

Η πιο άμεση ερευνητική προτεραιότητα είναι η δημιουργία μικρού πειραματικού testbed. Όχι πλήρες Space Farm. Ένα ελεγχόμενο υποσύστημα που να συνδέει PBR ή υδροπονική μονάδα με αισθητήρες, edge node, anomaly detection, digital twin και απλές πολιτικές L1–L4. Εκεί θα φανεί γρήγορα τι λειτουργεί και τι απλώς ακούγεται πειστικό στο χαρτί.

Δεύτερη προτεραιότητα είναι η βιολογική επικύρωση. Τα μελλοντικά πειράματα δεν πρέπει να μετρούν μόνο βιομάζα ή O₂. Χρειάζονται δείκτες σταθερότητας καλλιέργειας, biofouling, μεταβολικής απόκλισης, ικανότητας ανάκαμψης μετά από stress και συμβατότητας με άλλες ροές του BLSS. Η βιολογία πρέπει να διαβάζεται ως δυναμικό υποσύστημα, όχι ως σταθερή πηγή παραγωγής.

Τρίτη προτεραιότητα είναι η επικύρωση της ανθεκτικότητας. Τα R1–R4 πρέπει να δοκιμαστούν με ελεγχόμενες αστοχίες. Τι γίνεται όταν ένας αισθητήρας pH αποκλίνει αργά; Τι γίνεται όταν η εικόνα δείχνει stress αλλά τα θρεπτικά φαίνονται φυσιολογικά; Τι γίνεται όταν ο edge node χάσει σύνδεση με το habitat network; Οι απαντήσεις δεν μπορούν να δοθούν μόνο με λογικό διάγραμμα.

7.5 Τελική αποτίμηση

Η κεντρική θέση της εργασίας είναι ότι η Διαστημική Γεωργία Ακριβείας πρέπει να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα αρχιτεκτονικής ολοκλήρωσης. Η παραγωγή τροφής είναι μόνο ένα μέρος. Το ίδιο σημαντικά είναι η ανακύκλωση μάζας, η διαχείριση ενέργειας, η αξιοπιστία αισθητήρων, η καθυστέρηση επικοινωνίας, η βιολογική ερμηνεία των δεδομένων και η ανάκαμψη μετά από αστοχία.

Τα Κεφάλαια 3 και 4 έδειξαν ότι το πεδίο έχει ώριμα κομμάτια, αλλά όχι πλήρες ενιαίο σύστημα. Το Κεφάλαιο 5 πρότεινε αρχιτεκτονική απάντηση. Το Κεφάλαιο 6 μετέφερε αυτή την αρχιτεκτονική σε λειτουργικό εννοιολογικό μοντέλο Space Farm. Το παρόν κεφάλαιο κλείνει τον κύκλο: η συμβολή της εργασίας δεν είναι ότι “έλυσε” το πρόβλημα της διαστημικής γεωργίας. Είναι ότι το έκανε πιο συγκεκριμένο, πιο μετρήσιμο και πιο ελέγξιμο.

Αυτό είναι το ουσιαστικό αποτέλεσμα. Η μελλοντική διαστημική καλλιέργεια δεν θα προκύψει μόνο από καλύτερα φυτά, καλύτερους αισθητήρες ή ισχυρότερα μοντέλα ΑΙ. Θα προκύψει από τη σύνδεσή τους σε ένα σύστημα που γνωρίζει πότε βλέπει σωστά, πότε αμφιβάλλει, πότε ενεργεί και πότε υποχωρεί σε ασφαλή λειτουργία. Εκεί βρίσκεται η πραγματική μετάβαση από τη διαστημική καλλιέργεια στη Διαστημική Γεωργία Ακριβείας.

Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

- [1] NASA, “Artemis.” 2026. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/artemis>
- [2] NASA, “Gateway.” 2026. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/gateway/>
- [3] European Space Agency (ESA), “Terraenovae – our destinations in human and robotic exploration.” 2021. [Online]. Available: <https://vision.esa.int/terraenovae-our-destinations-in-human-and-robotic-exploration/>
- [4] SpaceX, “Making Life Multiplanetary.” [Online]. Available: <https://www.spacex.com/humanspaceflight/mars/>
- [5] C. M. Johnson et al., “Supplemental food production with plants: a review of NASA research,” *Front. Astron. Space Sci.*, vol. 8, p. 734343, 2021, doi: 10.3389/fspas.2021.734343.
- [6] T. Verbeelen, N. Leys, R. Ganigue, and F. Mastroleo, “Development of nitrogen recycling strategies for bioregenerative life support systems in space,” *Front. Microbiol.*, vol. 12, p. 700810, 2021, doi: 10.3389/fmicb.2021.700810.
- [7] O. Monje et al., “Hardware validation of the advanced plant habitat on ISS: Canopy photosynthesis in reduced gravity,” *Front. Plant Sci.*, vol. 11, p. 673, 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.00673.
- [8] P. Zabel, C. Zeidler, V. Vrakking, M. Dorn, and D. Schubert, “Biomass production of the EDEN ISS space greenhouse in antarctica during the 2018 experiment phase,” *Front. Plant Sci.*, vol. 11, p. 656, 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.00656.
- [9] C. Zeidler et al., “The plant health monitoring system of the EDEN ISS space greenhouse in antarctica during the 2018 experiment phase,” *Front. Plant Sci.*, vol. 10, p. 1457, 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.01457.
- [10] A.-L. Paul, C. E. Amalfitano, and R. J. Ferl, “Plant growth strategies are remodeled by spaceflight,” *BMC Plant Biol.*, vol. 12, p. 232, 2012, doi: 10.1186/1471-2229-12-232.
- [11] B. E. G., T. Mulholland, J. M. T. S., and Podolsky, I. G., “Lada: The ISS Plant Substrate Microgravity Testbed,” *SAE Tech. Pap. Ser.*, pp. 2002-01–2388, doi: 10.4271/2002-01-2388.
- [12] R. D. MacElroy, J. Tremor, D. T. Smernoff, W. Knott, and R. P. Prince, “A review of recent activities in the NASA CELSS program,” *Adv. Space Res.*, vol. 7, no. 4, pp. 53–57, 1987, doi: 10.1016/0273-1177(87)90032-9.
- [13] R. M. Wheeler, G. D. Massa, J. M. Bunchek, and L. Spencer, “Pick-and-eat space crop production flight testing on the international space station,” *J. Space Saf. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 170–181, 2024, doi: 10.1080/17429145.2023.2292220.
- [14] C. Lasseur et al., “MELISSA: The European project of a closed life support system,” *Gravitational Space Res.*, vol. 23, no. 1, pp. 3–12, 2010.
- [15] A. C. Tricco et al., “PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation,” *Ann. Intern. Med.*, vol. 169, no. 7, pp. 467–473, 2018, doi: 10.7326/M18-0850.

- [16] M. D. J. Peters, C. Godfrey, H. Khalil, P. McInerney, D. Parker, and C. B. Soares, "Guidance for conducting systematic scoping reviews," *Int. J. Evid. Based Healthc.*, vol. 13, no. 3, pp. 141–146, 2015, doi: 10.1097/XEB.0000000000000050.
- [17] Stutte, Gary W., Wheeler, Raymond M., Morrow, Robert C., and Newsham, Gerard, "Concept for Sustained Plant Production on ISS Using VEGGIE Capillary Mat Rooting System," in *41st International Conference on Environmental Systems*, Portland, Oregon: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011, pp. 52–63. doi: 10.2514/6.2011-5263.
- [18] Mergeay, M., Verstraete, W., Dubertret, G., Lefort-Tran, M., Chipaux, C., and Binot, R., "MELiSSA: A Microorganisms Based Model for CELSS Development," in *Proceedings of the 3rd Symposium on Space Thermal Control and Life Support Systems Place*, in ESA SP-288. Noordwijk, The Netherlands: ESA, 1988, pp. 65–68.
- [19] Peters, M. D. J., Godfrey, C., McInerney, P., Munn, Z., Tricco, A. C., and Khalil, H., "Chapter 11: Scoping Reviews," in *JBI Manual for Evidence Synthesis*, Adelaide: JBI, 2020, pp. 406–451. doi: 10.46658/JBIMES-20-12.
- [20] Amir-Behghadami, Mehrdad and Janati, Ali, "Population, Intervention, Comparison, Outcomes and Study (PICOS) design as a framework to formulate eligibility criteria in systematic reviews," *Emerg. Med. J.*, vol. 37, no. 6, pp. 387–387, 2020, doi: 10.1136/emered-2020-209567.
- [21] National Aeronautics and Space Administration, "NASA's Lunar Exploration Program Overview," NASA, Washington, DC, Program Overview, Sep. 2020. Accessed: Apr. 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/humans-in-space/artemis/>
- [22] M. Kane and K. C. Shasteen, "Importance and challenges of integrating BLSS into ECLSS," *Acta Astronautica*, vol. 220, pp. 185–196, 2024. doi: 10.1016/j.actaastro.2024.04.016.
- [23] C. Verseux, M. Baqué, K. Lehto, J.-P. P. De Vera, L. J. Rothschild, and D. Billi, "Sustainable life support on Mars - The potential roles of cyanobacteria," *International Journal of Astrobiology*, vol. 15, no. 1, pp. 65–92, 2016. doi: 10.1017/S147355041500021X.
- [24] L. Poulet et al., "Large-Scale Crop Production for the Moon and Mars: Current Gaps and Future Perspectives," *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 8, 2022. doi: 10.3389/fspas.2021.733944.
- [25] G.-G. D et al., "Integration of Nitrifying, Photosynthetic and Animal Compartments at the MELiSSA Pilot Plant," *Front. Astron. Space Sci.*, vol. 8, p. 750616.0, 2021, doi: 10.3389/fspas.2021.750616.
- [26] G. Detrell, "Chlorella Vulgaris Photobioreactor for Oxygen and Food Production on a Moon Base—Potential and Challenges," *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 8, 2021. doi: 10.3389/fspas.2021.700579.
- [27] National Aeronautics and Space Administration, "Reference Guide to the International Space Station," NASA, Houston, TX, Reference Guide, Sep. 2015. Accessed: Mar. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/09/np-2015-05-022-jsc-iss-guide-2015-update-111015-508c.pdf>
- [28] Salisbury, Frank B., Gitelson, Joseph I., and Lisovsky, Genry M., "Bios-3: Siberian experiments in bioregenerative life support," *BioScience*, vol. 47, no. 9, 1997, doi: 10.2307/1313164.

- [29] L. Poughon et al., "Limnospira indica PCC8005 growth in photobioreactor: model and simulation of the ISS and ground experiments," *Life Sciences in Space Research*, vol. 25. pp. 53–65, 2020. doi: 10.1016/j.lssr.2020.03.002.
- [30] H. Badri, P. Monsieus, I. Coninx, R. Wattiez, and N. Leys, "Molecular investigation of the radiation resistance of edible cyanobacterium *Arthrospira* sp. PCC 8005," *MicrobiologyOpen*, vol. 4, no. 2. pp. 187–207, 2015. doi: 10.1002/mbo3.229.
- [31] T. P. Ramalho, G. Chopin, O. M. Pérez-Carrascal, N. Tromas, and C. Verseux, "Selection of *Anabaena* sp. PCC 7938 as a Cyanobacterium Model for Biological ISRU on Mars," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 88, no. 15. 2022. doi: 10.1128/aem.00594-22.
- [32] S. Khoshtinat, J. Long-Fox, and S. M. J. Hosseini, "From Earth to Mars: a perspective on exploiting biomineralization for Martian construction," *Frontiers in Microbiology*, vol. 16. 2025. doi: 10.3389/fmicb.2025.1645014.
- [33] V. Page and U. Feller, "Selection and hydroponic growth of bread wheat cultivars for bioregenerative life support systems," *Advances in Space Research*, vol. 52, no. 3. pp. 536–546, 2013. doi: 10.1016/j.asr.2013.03.027.
- [34] K. Molders et al., "Selection and hydroponic growth of potato cultivars for bioregenerative life support systems," *Advances in Space Research*, vol. 50, no. 1. pp. 156–165, 2012. doi: 10.1016/j.asr.2012.03.025.
- [35] M. Wang, Y. Fu, and H. Liu, "Nutritional status and ion uptake response of *Gynura bicolor* DC. between Porous-tube and traditional hydroponic growth systems," *Acta Astronautica*, vol. 113. pp. 13–21, 2015. doi: 10.1016/j.actaastro.2015.03.023.
- [36] P. J. Janssen et al., "Genome sequence of the edible cyanobacterium *Arthrospira* sp. PCC 8005," *Journal of Bacteriology*, vol. 192, no. 9. pp. 2465–2466, 2010. doi: 10.1128/JB.00116-10.
- [37] J. De Paepe, K. De Paepe, F. Gòdia, K. Rabaey, S. E. Vlaeminck, and P. Clauwaert, "Bio-electrochemical COD removal for energy-efficient, maximum and robust nitrogen recovery from urine through membrane aerated nitrification," *Water Research*, vol. 185. 2020. doi: 10.1016/j.watres.2020.116223.
- [38] N. Talebzadeh and P. G. O'Brien, "Elliptic array luminescent solar concentrators for combined power generation and microalgae growth," *Energies*, vol. 14, no. 17. 2021. doi: 10.3390/en14175229.
- [39] B. Oommen et al., "The Space Analog for the Moon and Mars (SAM): a hermetically-sealed and pressurized terrestrial analog station and research facility, from inception to crewed analog missions and beyond," *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. pp. 87–97, 2024. doi: 10.52202/078374-0010.
- [40] A. J. Burgess, R. Pranggono, M. Escribà-Gelonch, and V. Hessel, "Biofortification for space farming: Maximising nutrients using lettuce as a model plant," *Future Foods*, vol. 9. 2024. doi: 10.1016/j.fufo.2024.100317.
- [41] M. G. Kamran and others, "Optimising Plant Form and Function for Controlled Environment Agriculture in Space and on Earth," *Mod. Agric.*, vol. 1, no. 2, pp. 86–97, 2023, doi: 10.1002/moda.20.
- [42] X. Xie, J. Zhan, and M. Ren, "Microalgae: A Solution for Food Security and Multiplanetary Farming," *Food Frontiers*, vol. 6, no. 3. pp. 1242–1251, 2025. doi: 10.1002/fft2.70020.

- [43] J. M. Ortega-Hernandez et al., “Key factors in developing controlled closed ecosystems for lunar missions,” *Resources, Environment and Sustainability*, vol. 16. 2024. doi: 10.1016/j.resenv.2024.100160.
- [44] M. Casula, G. Fais, A. Sidorowicz, P. Caboni, G. Cao, and A. Concas, “Effects of a novel bioprocess for the cultivation *Synechococcus nidulans* on Mars on its biochemical composition: focus on the lipidome,” *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, vol. 29, no. 2. pp. 361–376, 2024. doi: 10.1007/s12257-024-00019-3.
- [45] M. Nguyen et al., “Space farming: Horticulture systems on spacecraft and outlook to planetary space exploration,” *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 194. pp. 708–721, 2023. doi: 10.1016/j.plaphy.2022.12.017.
- [46] K. Spalvins, Z. Kusnere, and S. Raita, “Sustaining a Mars Colony through Integration of Single-Cell Oil in Biological Life Support Systems,” *Environmental and Climate Technologies*, vol. 27, no. 1. pp. 339–367, 2023. doi: 10.2478/rtuct-2023-0026.
- [47] J. Fahrion et al., “ARTHROSPIRA-C space flight experiment: Validation of biomass and oxygen production bioprocesses in a space bioreactor prior to upload to space,” *Acta Astronautica*, vol. 229. pp. 374–390, 2025. doi: 10.1016/j.actaastro.2024.11.010.
- [48] N. Sachdeva et al., “Ground Demonstration of the Use of *Limnospira indica* for Air Revitalization in a Bioregenerative Life-Support System Setup: Effect of Non-Nitrified Urine-Derived Nitrogen Sources,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 8. 2021. doi: 10.3389/fspas.2021.700270.
- [49] D. Garcia-Gragera, E. Peiro, C. Arnau, J.-F. Cornet, C.-G. Dussap, and F. Godia, “Dynamics of long-term continuous culture of *Limnospira indica* in an air-lift photobioreactor,” *Microbial Biotechnology*, vol. 15, no. 3. pp. 931–948, 2022. doi: 10.1111/1751-7915.13882.
- [50] J. Fahrion, C. G. Dussap, and N. Leys, “Assessment of batch culture conditions for cyanobacterial propagation for a bioreactor in space,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 10. 2023. doi: 10.3389/fspas.2023.1178332.
- [51] M. Muys et al., “Light regime, harvesting time and operation mode can optimize the productivity of nutritional protein in *Chlorella* and *Spirulina* biomass,” *Algal Research*, vol. 79. 2024. doi: 10.1016/j.algal.2024.103443.
- [52] F. Deschoenmaecker et al., “Impact of different nitrogen sources on the growth of *Arthrospira* sp. PCC 8005 under batch and continuous cultivation – A biochemical, transcriptomic and proteomic profile,” *Bioresource Technology*, vol. 237. pp. 78–88, 2017. doi: 10.1016/j.biortech.2017.03.145.
- [53] I. P. E. Macário et al., “Cyanobacteria as Candidates to Support Mars Colonization: Growth and Biofertilization Potential Using Mars Regolith as a Resource,” *Frontiers in Microbiology*, vol. 13. 2022. doi: 10.3389/fmicb.2022.840098.
- [54] A. Concas et al., “Modeling and experimental assessment of *Synechococcus nidulans* cultivation using simulated Martian medium and astronauts’ urine,” *Acta Astronautica*, vol. 205. pp. 185–198, 2023. doi: 10.1016/j.actaastro.2023.01.027.
- [55] M. Arribas Tiemblo, I. P. E. Macário, A. Tornero, A. Yáñez, S. Andrejkovičová, and F. Gómez, “Survival of Filamentous Cyanobacteria Through Martian ISRU: Combined Effects of Desiccation and UV-B Radiation,” *Microorganisms*, vol. 13, no. 5. 2025. doi: 10.3390/microorganisms13051083.

- [56] I. Santos de Sousa et al., "The potential of far-red light-acclimating cyanobacteria to support sustainable outposts on Mars," *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 12. 2025. doi: 10.3389/fspas.2025.1658632.
- [57] T. P. Ramalho, G. Chopin, L. Salman, V. Baumgartner, C. Heinicke, and C. Verseux, "On the growth dynamics of the cyanobacterium *Anabaena* sp. PCC 7938 in Martian regolith," *npj Microgravity*, vol. 8, no. 1. 2022. doi: 10.1038/s41526-022-00240-5.
- [58] P. Rzymiski, B. Poniedziałek, N. Hippmann, and Ł. Kaczmarek, "Screening the Survival of Cyanobacteria Under Perchlorate Stress. Potential Implications for Mars In Situ Resource Utilization," *Astrobiology*, vol. 22, no. 6. pp. 672–684, 2022. doi: 10.1089/ast.2021.0100.
- [59] K. Tomita-Yokotani et al., "Investigation of *Nostoc* sp. HK-01, Cell Survival over Three Years during the Tanpopo Mission," *Astrobiology*, vol. 21, no. 12. pp. 1505–1514, 2021. doi: 10.1089/ast.2021.0152.
- [60] L. J. Mapstone, M. N. Leite, S. Purton, I. A. Crawford, and L. Dartnell, "Cyanobacteria and microalgae in supporting human habitation on Mars," *Biotechnology Advances*, vol. 59. 2022. doi: 10.1016/j.biotechadv.2022.107946.
- [61] B. Farges, C. Laroche, J.-F. Cornet, and C.-G. Dussap, "Spectral kinetic modeling and long-term behavior assessment of *arthrospira platensis* growth in photobioreactor under red (620 nm) light illumination," *Biotechnology Progress*, vol. 25, no. 1. pp. 151–162, 2009. doi: 10.1002/btpr.95.
- [62] G. Murukesan et al., "Pressurized Martian-Like Pure CO₂ Atmosphere Supports Strong Growth of Cyanobacteria, and Causes Significant Changes in their Metabolism," *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, vol. 46, no. 1. pp. 119–131, 2016. doi: 10.1007/s11084-015-9458-x.
- [63] K. Olsson-Francis, R. De La Torre, and C. S. Cockell, "Isolation of novel extreme-tolerant cyanobacteria from a rock-dwelling microbial community by using exposure to low earth orbit," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 76, no. 7. pp. 2115–2121, 2010. doi: 10.1128/AEM.02547-09.
- [64] N. J. H. Aversch and L. J. Rothschild, "Metabolic engineering of *Bacillus subtilis* for production of para-aminobenzoic acid – unexpected importance of carbon source is an advantage for space application," *Microbial Biotechnology*, vol. 12, no. 4. pp. 703–714, 2019. doi: 10.1111/1751-7915.13403.
- [65] I. Wagner and C. Posten, "Pressure reduction affects growth and morphology of *Chlamydomonas reinhardtii*," *Engineering in Life Sciences*, vol. 17, no. 5. pp. 552–560, 2017. doi: 10.1002/elsc.201600131.
- [66] C. Renaud, N. Leys, and R. Wattiez, "Photosynthetic microorganisms, an overview of their biostimulant effects on plants and perspectives for space agriculture," *Journal of Plant Interactions*, vol. 18, no. 1. 2023. doi: 10.1080/17429145.2023.2242697.
- [67] J. Zhang, H. Yang, Y. Sun, B. Yan, W. Chen, and D. Fan, "The potential use of microalgae for nutrient supply and health enhancement in isolated and confined environments," *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 23, no. 4. 2024. doi: 10.1111/1541-4337.13418.
- [68] Y. Zou et al., "Evaluation of microalgae on preventing bone loss in C57BL/6J mice induced by hindlimb suspension," *Food Frontiers*, vol. 4, no. 3. pp. 1311–1323, 2023. doi: 10.1002/fft2.254.

- [69] E. Frossard et al., "Recycling nutrients from organic waste for growing higher plants in the Micro Ecological Life Support System Alternative (MELISSA) loop during long-term space missions," *Life Sciences in Space Research*, vol. 40. pp. 176–185, 2024. doi: 10.1016/j.lssr.2023.08.005.
- [70] A. Ellery, "Supplementing closed ecological life support systems with in-situ resources on the moon," *Life*, vol. 11, no. 8. 2021. doi: 10.3390/life11080770.
- [71] M. Kane and K. C. Shasteen, "Importance and Challenges of Integrating BLSS into ECLSS," *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*, vol. 2023-October. 2023. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/pages/publications/85188001271?origin=resultslist>
- [72] R. Keller, K. Goli, W. Porter, A. Alrabaa, and J. A. Jones, "Cyanobacteria and Algal-Based Biological Life Support System (BLSS) and Planetary Surface Atmospheric Revitalizing Bioreactor Brief Concept Review," *Life*, vol. 13, no. 3. 2023. doi: 10.3390/life13030816.
- [73] T. P. Ramalho et al., "Resource-efficiency of cyanobacterium production on Mars: Assessment and paths forward," *Algal Research*, vol. 84. 2024. doi: 10.1016/j.algal.2024.103801.
- [74] N. S. Kruyer, M. J. Realff, W. Sun, C. L. Genzale, and P. Peralta-Yahya, "Designing the bioproduction of Martian rocket propellant via a biotechnology-enabled in situ resource utilization strategy," *Nature Communications*, vol. 12, no. 1. 2021. doi: 10.1038/s41467-021-26393-7.
- [75] A. A. Menezes, J. Cumbers, J. A. Hogan, and A. P. Arkin, "Towards synthetic biological approaches to resource utilization on space missions," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 12, no. 102. 2015. doi: 10.1098/rsif.2014.0715.
- [76] L. Poughon, C. Creuly, F. Godia, N. Leys, and C.-G. Dussap, "Photobioreactor *Limnospira indica* Growth Model: Application From the MELISSA Plant Pilot Scale to ISS Flight Experiment," *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 8. 2021. doi: 10.3389/fspas.2021.700277.
- [77] G. Fais et al., "Wide Range Applications of Spirulina: From Earth to Space Missions," *Marine Drugs*, vol. 20, no. 5. 2022. doi: 10.3390/md20050299.
- [78] R. Shergill, "Bioregenerative algal architectures," *Journal of Chinese Architecture and Urbanism*, vol. 5, no. 3. 2023. doi: 10.36922/JCAU.179.
- [79] L. E, B. M, C. L, C. R, P. L, and L. R. N, "Synechococcus sp. PCC7335 responses to far-red enriched spectra and anoxic/microoxic atmospheres: Potential for astrobiotechnological applications," *Plant Physiol. Biochem.*, vol. 213, p. 108793.0, 2024, doi: 10.1016/j.plaphy.2024.108793.
- [80] Y. Deng et al., "Overall Material Flow Scheme Design of Controlled Ecological Life Support System for Lunar Base," *Space: Science and Technology (United States)*, vol. 5. 2025. doi: 10.34133/space.0236.
- [81] P. Kasiviswanathan, E. D. Swanner, L. J. Halverson, and P. Vijayapalani, "Farming on Mars: Treatment of basaltic regolith soil and briny water simulants sustains plant growth," *PLoS ONE*, vol. 17, no. 8 August. 2022. doi: 10.1371/journal.pone.0272209.
- [82] C. Verseux et al., "A Low-Pressure, N₂/CO₂ Atmosphere Is Suitable for Cyanobacterium-Based Life-Support Systems on Mars," *Frontiers in Microbiology*, vol. 12. 2021. doi: 10.3389/fmicb.2021.611798.

- [83] Z. Mazur and I. Ślesak, "Cyanobacteria Under UV Radiation: General Insights into Stress Responses," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 26, no. 22. 2025. doi: 10.3390/ijms262210926.
- [84] M. Casula et al., "Impact of low-dose X-ray radiation on the lipidome of *Chlorella vulgaris*," *Algal Research*, vol. 84. 2024. doi: 10.1016/j.algal.2024.103783.
- [85] J. Fahrion, S. Gupta, F. Mastroleo, C. G. Dussap, and N. Leys, "Chronic low-dose rate irradiation induces transient hormesis effect on cyanobacterium *Limnospira indica*," *iScience*, vol. 28, no. 3. 2025. doi: 10.1016/j.isci.2025.111891.
- [86] A. Napoli et al., "Absence of increased genomic variants in the cyanobacterium *Chroococcidiopsis* exposed to Mars-like conditions outside the space station," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1. 2022. doi: 10.1038/s41598-022-12631-5.
- [87] M. Maton, B. Leroy, and A. V. Wouwer, "Metabolic Modeling of *Arthrospira* sp. PCC 8005 - Network Definition and Experimental Validation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 59, no. 6. pp. 391–396, 2025. doi: 10.1016/j.ifacol.2025.07.177.
- [88] G. Ellena et al., "Development and implementation of a simulated microgravity setup for edible cyanobacteria," *npj Microgravity*, vol. 10, no. 1. 2024. doi: 10.1038/s41526-024-00436-x.
- [89] F. Rewicki, J. Gawlikowski, J. Niebling, and J. Denzler, "Unraveling Anomalies in Time: Unsupervised Discovery and Isolation of Anomalous Behavior in Bio-Regenerative Life Support System Telemetry," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 14949 LNAI. pp. 207–222, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-70378-2_13.
- [90] C. C.R et al., "Cloud-Enabled Multi-Axis Soilless Clinostat for Earth-Based Simulation of Partial Gravity and Light Interaction in Seedling Tropisms," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 8.0, p. 261, 2025, doi: 10.3390/agriengineering7080261.
- [91] R. J.H, B. J, and S. Z, "A low-cost autonomous and scalable hydroponics system for space farming," *HardwareX*, vol. 21, p. e00625, 2025, doi: 10.1016/j.ohx.2025.e00625.
- [92] P. I, B. B, K. R, and S.-I. C, "A Novel Cloud Architecture for Internet of Space Things (IoST)," *IEEE Access*, vol. 10, p. 15118.0-15134.0, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144137.
- [93] J. A.G, I. Concepcion R., G. M, and F. A, "A Cloud Computing Framework for Space Farming Data Analysis," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 5.0, p. 149, 2025, doi: 10.3390/agriengineering7050149.
- [94] Metelo, Frederico, Soares, Cláudia, Racković, Stevo, and Costa, Pedro Ákos, "PeersimGym: An Environment for Solving the Task Offloading Problem with Reinforcement Learning," in *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Applied Data Science Track*, in *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2024, pp. 38–54. doi: 10.1007/978-3-031-70378-2_3.
- [95] N. J. Suganob and R. Concepcion, "Adaptive Neuro-Fuzzy-Based Environment Sensing and Control of a Fogponics System Under Simulated Partial Gravity," 2025 4th International Conference on Computing, Management and Telecommunications, *ComManTel 2025*. pp. 93–98, 2025. doi: 10.1109/ComManTel68363.2025.11368579.
- [96] Z. Teng et al., "Microgreens for Home, Commercial, and Space Farming: A Comprehensive Update of the Most Recent Developments," *Annual Review of Food*

- Science and Technology, vol. 14. pp. 539–562, 2023. doi: 10.1146/annurev-food-060721-024636.
- [97] J. Qin et al., “A hyperspectral plant health monitoring system for space crop production,” *Frontiers in Plant Science*, vol. 14. 2023. doi: 10.3389/fpls.2023.1133505.
- [98] M. Battistuzzi et al., “A New Remote Sensing-Based System for the Monitoring and Analysis of Growth and Gas Exchange Rates of Photosynthetic Microorganisms Under Simulated Non-Terrestrial Conditions,” *Frontiers in Plant Science*, vol. 11. 2020. doi: 10.3389/fpls.2020.00182.
- [99] M. Garegnani et al., “Non-destructive real-time analysis of plant metabolite accumulation in radish microgreens under different LED light recipes,” *Frontiers in Plant Science*, vol. 14. 2023. doi: 10.3389/fpls.2023.1289208.
- [100] J. Tallec et al., “Implementation of an automated process for *Limnospira indica* harvesting and culture medium recycling for space applications,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 10. 2023. doi: 10.3389/fspas.2023.1229043.
- [101] S. Liang, N. V. Duc Long, M. I. Parvin, M. Escribà-Gelonch, S. Lantin, and V. Hessel, “Digital twin for lettuce growth in six climate zones (‘Climate 2050’),” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 238. 2025. doi: 10.1016/j.compag.2025.110880.
- [102] R. J.H, S. Z, and B. J, “An Application of System Dynamics to Characterize Crop Production for Autonomous Indoor Farming Platforms (AIFP),” *Horticulturae*, vol. 9, no. 12.0, p. 1318, 2023, doi: 10.3390/horticulturae9121318.
- [103] S. N.J, A. C.L, and I. Concepcion R., “Interplay of Fogponics and Artificial Intelligence for Potential Application in Controlled Space Farming,” *AgriEngineering*, vol. 6, no. 3.0, p. 2144.0-2166.0, 2024, doi: 10.3390/agriengineering6030126.
- [104] C. Posten, “Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae,” *Engineering in Life Sciences*, vol. 9, no. 3. pp. 165–177, 2009. doi: 10.1002/elsc.200900003.
- [105] I. Haberkorn, C. L. Off, M. D. Besmer, L. Buchmann, and A. Mathys, “Automated Online Flow Cytometry Advances Microalgal Ecosystem Management as in situ, High-Temporal Resolution Monitoring Tool,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 9. 2021. doi: 10.3389/fbioe.2021.642671.
- [106] L. J. Mapstone, H. N. Taunt, J. Cui, S. Purton, and T. G. R. Brooks, “ADA: an open-source software platform for plotting and analysis of data from laboratory photobioreactors,” *Applied Phycology*, vol. 3, no. 1. pp. 16–26, 2022. doi: 10.1080/26388081.2021.2023632.
- [107] A. M. D. Al Ketife, S. Judd, and H. Znad, “A mathematical model for carbon fixation and nutrient removal by an algal photobioreactor,” *Chemical Engineering Science*, vol. 153. pp. 354–362, 2016. doi: 10.1016/j.ces.2016.07.042.
- [108] I. Dudina, E. Kalashnikova, and R. Kirakosyan, “The creation of the photobioreactor for the effective chlorella growth and study of the light spectral composition influence on its biomass,” *E3S Web of Conferences*, vol. 376. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202337602026.
- [109] T. M. Roffi and C. A. Jamhari, “Internet of things based automated monitoring for indoor aeroponic system,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, no. 1. pp. 270–277, 2023. doi: 10.11591/ijece.v13i1.pp270-277.

- [110] R. J. Keller, W. Porter, K. Goli, R. Rosenthal, N. Butler, and J. A. Jones, "Biologically-based and physiochemical life support and in situ resource utilization for exploration of the solar system—reviewing the current state and defining future development needs," *Life*, vol. 11, no. 8. 2021. doi: 10.3390/life11080844.
- [111] R. M. Wheeler, "Agriculture for space: People and places paving the way," *Open Agriculture*, vol. 2, no. 1. pp. 14–32, 2017. doi: 10.1515/opag-2017-0002.
- [112] J. Fahrion, F. Mastroleo, C.-G. Dussap, and N. Leys, "Use of Photobioreactors in Regenerative Life Support Systems for Human Space Exploration," *Frontiers in Microbiology*, vol. 12. 2021. doi: 10.3389/fmicb.2021.699525.
- [113] G. D. Barone et al., "Recent developments in the production and utilization of photosynthetic microorganisms for food applications," *Heliyon*, vol. 9, no. 4. 2023. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14708.
- [114] F. Oluwafemi, "Space food on celestial bodies and on the way there," *Future Foods: Global Trends, Opportunities, and Sustainability Challenges*. 2021. doi: 10.1016/B978-0-323-91001-9.00012-8.
- [115] R. Pagliarello et al., "Effects of gamma radiation on engineered tomato biofortified for space agriculture by morphometry and fluorescence-based indices," *Frontiers in Plant Science*, vol. 14. 2023. doi: 10.3389/fpls.2023.1266199.
- [116] P. B, S. D, and D. M, "Veganaut space nutrition: Advanced biosystems and strategies to enable plant-based diets for sustainable space exploration," *Proc. Int. Astronaut. Congr. IAC*, p. 436.0-447.0, 2025, doi: 10.52202/083083-0050.
- [117] I. V. Markin, E. S. Shchelkanova, R. A. Volodyashkin, E. A. Zhurbin, and A. Ya. Fisun, "Prospects for creation of autonomous life support complexes using biological systems for arctic and far north conditions," *Medicina Katastrof*, vol. 2021, no. 3. pp. 73–80, 2021. doi: 10.33266/2070-1004-2021-3-73-80.
- [118] H. Fazayeli, A. L. M. Daigh, C. Palmer, S. Pitla, D. Jones, and Y. Ge, "Space Agriculture: A Comprehensive Systems-Level Review of Challenges and Opportunities," *Agriculture*, vol. 15, no. 24, p. 2541, 2025, doi: 10.3390/agriculture15242541.
- [119] J. Zhang et al., "Competitive Growth Assay of Mutagenized *Chlamydomonas reinhardtii* Compatible With the International Space Station Veggie Plant Growth Chamber," *Frontiers in Plant Science*, vol. 11. 2020. doi: 10.3389/fpls.2020.00631.
- [120] A. Mahnert et al., "Microbiome dynamics during the HI-SEAS IV mission, and implications for future crewed missions beyond Earth," *Microbiome*, vol. 9, no. 1. 2021. doi: 10.1186/s40168-020-00959-x.
- [121] C. Verseux, T. P. Ramalho, E. Bohuon, N. Kunst, V. Lang, and C. Heinicke, "Dependence of cyanobacterium growth and Mars-specific photobioreactor mass on total pressure, pN₂ and pCO₂," *npj Microgravity*, vol. 10, no. 1. 2024. doi: 10.1038/s41526-024-00440-1.
- [122] M. Nelson, W. F. Dempster, and J. P. Allen, "Integration of lessons from recent research for 'Earth to Mars' life support systems," *Advances in Space Research*, vol. 41, no. 5. pp. 675–683, 2008. doi: 10.1016/j.asr.2007.02.075.

1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Δήλωση Χρήσης Εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης κατά τη Συγγραφή

Στο πλαίσιο της ακαδημαϊκής δεοντολογίας και της αρχής της διαφάνειας, στο παρόν παράρτημα δηλώνεται αναλυτικά η χρήση εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα εργαλεία αυτά αξιοποιήθηκαν αποκλειστικά ως βοηθητικά μέσα, υπό τη συνεχή εποπτεία, τον έλεγχο και την κριτική αξιολόγηση του/της συγγραφέα.

Ο/Η συγγραφέας φέρει την πλήρη και αποκλειστική ευθύνη για το περιεχόμενο, τις επιστημονικές θέσεις, την ανάλυση, τα συμπεράσματα και το τελικό κείμενο της εργασίας. Κάθε αποτέλεσμα που προέκυψε με τη συνδρομή εργαλείων AI επαληθεύτηκε ως προς την ορθότητα και την τεκμηρίωσή του έναντι των πρωτογενών πηγών.

2 A.1 Ανάλυση και οργάνωση του βιβλιογραφικού σώματος

Εργαλείο: Google NotebookLM (με υποστήριξη του μοντέλου Gemini).

Για την οργάνωση και ανάλυση του βιβλιογραφικού σώματος της ανασκόπησης πεδίου εφαρμογής (scoping review, κατά PRISMA-ScR), αξιοποιήθηκε το Google NotebookLM. Το σύνολο των 127 συμπεριληφθεισών πηγών εισήχθη ως τεκμήρια στο εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για:

- **εξερεύνηση:** την πλοήγηση και τη διερεύνηση του υλικού κατά μήκος των τεσσάρων θεματικών αξόνων (A1–A4).
- **σύνοψη:** τη γρήγορη ανάκτηση τεκμηριωμένων απαντήσεων και συνόψεων, με παραπομπές στις πρωτογενείς πηγές (grounded, source-linked).
- **σύνθεση:** την υποβοήθηση στη διασταύρωση και σύνθεση πληροφοριών μεταξύ πολλαπλών εργασιών.

Επισημαίνεται ότι η τελική επιλογή των πηγών, η κατηγοριοποίηση στους θεματικούς άξονες, η κριτική αξιολόγηση, η εξαγωγή των τεχνολογικών κενών (G1–G6) και όλες οι ερμηνείες και τα συμπεράσματα πραγματοποιήθηκαν και επαληθεύτηκαν από τον/την συγγραφέα. Το NotebookLM δεν χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή επιστημονικών ισχυρισμών χωρίς αντιπαραβολή με τις πηγές.

3 A.2 Δημιουργία σχημάτων και εικόνων

Εργαλείο παραγωγής εικόνων: ChatGPT.

Τα εννοιολογικά σχήματα και διαγράμματα της εργασίας δημιουργήθηκαν με τη συνδρομή εργαλείου παραγωγικής AI, βάσει κατευθυντήριων εντολών (prompts) που συνέταξε ο/η συγγραφέας. Η δομή, τα δεδομένα, οι ετικέτες και η επιστημονική ορθότητα κάθε σχήματος ελέγχθηκαν και, όπου χρειάστηκε, διορθώθηκαν από τον/την συγγραφέα.

Σχήμα	Τίτλος / Περιεχόμενο	Prompt
Εικόνα 2-1	Διάγραμμα ροής επιλογής μελετών (PRISMA-ScR)	Δημιούργησε ένα επαγγελματικό διάγραμμα ροής PRISMA-ScR για scoping review, με πέντε κάθετα στάδια: (1) Εντοπισμός, (2) Αποκλεισμός διπλότυπων, (3) Έλεγχος τίτλου/περίληψης, (4) Αποκλεισθέντα, (5) Συμπεριληφθέντα. Στάδιο 1: 247 εγγραφές από Scopus, ανάλυση σε πέντε σχήματα αναζήτησης (ΣΑ1=41, ΣΑ2=14, ΣΑ3=182,

		ΣΑ4=3, ΣΑ5=7). Αφαιρέθηκαν 10 διπλότυπα → 237 μοναδικές. Συνολικά αποκλεισθέντα 110 (ΑΚ2=38, ΑΚ3=67, ΑΚ4=5). Τελικά συμπεριληφθέντα: 127 (ποσοστό 54%). Χρωματική κωδικοποίηση ανά στάδιο, εικονίδια, ελληνικές ετικέτες με αγγλικό υπότιτλο, καθαρό λευκό φόντο.
Εικόνα 2-2	Κατανομή των 127 δημοσιεύσεων ανά τύπο	Το γράφημα δημιουργήθηκε από τα ίδια τα δεδομένα σε λογισμικό υπολογιστικών φύλλων/επεξεργαστή κειμένου και όχι με παραγωγική ΑΙ. Αν χρησιμοποιήθηκε ΑΙ, συμπλήρωσε εδώ το σχετικό prompt.
Εικόνα 5-3	Ροές δεδομένων, απόφασης και ελέγχου στην IoST-SPA	Λεπτομερές διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος «Ροές Δεδομένων, Απόφασης και Ελέγχου» για την προτεινόμενη IoST-SPA. Επάνω: Επικοινωνιακό Επίπεδο (τοπικοί κόμβοι αισθητήρων → edge nodes → gateway → πλατφόρμα → Γη/Κέντρο Ελέγχου Αποστολής). Έξι στήλες-επίπεδα με εικονίδια: (1) Αισθητήρες & Βιολογικά υποσυστήματα, (2) Συγχώνευση & Επικύρωση δεδομένων, (3) Edge Computing, (4) Digital Twin, (5) AI Decision Layer (Confidence Score, δρομολόγηση L1–L4), (6) Ενεργοποιήσεις & Ειδοποιήσεις. Κάτω: BLSS Integration Interface (CO₂, O₂, θρεπτικά, νερό, βιομάζα, απόβλητα). Βρόχος ανάδρασης ελέγχου. Υπόμνημα με χρωματιστά βέλη (ροή δεδομένων, γνωστικής απόφασης, ελέγχου/εντολών, ανάδρασης, τηλεμετρίας). Ελληνικές ετικέτες με αγγλικούς τεχνικούς όρους.
Εικόνα 5-4	IoST-SPA αρχιτεκτονική ως τετραεπίπεδο πλαίσιο	Καθαρό διάγραμμα τεσσάρων στοιβαγμένων επιπέδων για την IoST-SPA: Επίπεδο 1 Sensing & Actuation, Επίπεδο 2 Networking & Edge Data Layer, Επίπεδο 3 Digital Twin & AI Decision Layer, Επίπεδο 4 BLSS/ECLSS Integration & Operations — με σύντομη περιγραφή συστατικών σε κάθε επίπεδο και κάθετα βέλη σύνδεσης. Δεξιά κάθετη στήλη «Εγκάρσια ανθεκτικότητα» με R1 Διόρθωση, R2 Απομόνωση, R3 Safe mode, R4 Emergency. Κάτω πλαίσιο ροής: Βιβλιογραφικό σώμα → G1–G6 → αρχιτεκτονικές απαιτήσεις → SPA conceptual framework. Παστέλ χρώματα, ελληνικοί/αγγλικοί όροι.

Εικόνα 5-5	IoST-SPA ως εννοιολογικό πλαίσιο τεσσάρων επιπέδων	Εννοιολογικό διάγραμμα της IoST-SPA ως τετραεπίπεδο πλαίσιο με αριθμημένα επίπεδα (1 Αισθητήρων & Ενεργοποιητών, 2 Επικοινωνιακό, 3 Τοπικής Επεξεργασίας & Ψηφιακού Διδύμου, 4 Λήψης Αποφάσεων & Αυτονομίας), κάθε επίπεδο με εικονίδια-συστατικά. Αριστερά κάθετη «Ροή Δεδομένων», δεξιά «Εγκάρσιο Επίπεδο Ανθεκτικότητας» (Αξιοπιστία αισθητήρων, Ανίχνευση ανωμαλιών, Fault tolerance, Fallback πολιτικές, Graceful degradation, Cyber-physical ασφάλεια). Κάτω: BLSS Integration Interface και επεξηγηματική λεζάντα.
Εικόνα 5-6	Πρωτόκολλα και δικτυακές πρακτικές (Networking Layer)	Διάγραμμα με τα πρωτόκολλα και τις δικτυακές πρακτικές του Networking Layer και την αξιοποίησή τους στην IoST-SPA (π.χ. onboard-first επικοινωνία, τηλεμετρία, task offloading, ανθεκτικότητα δικτύου). Συμπλήρωσε/διόρθωσε το prompt ώστε να αντιστοιχεί ακριβώς στο σχήμα που χρησιμοποίησες.
Εικόνα 6-7	Εννοιολογικό μοντέλο Space Farm: φυσικά υποσυστήματα & ροές	Διάγραμμα εννοιολογικού μοντέλου Space Farm με φυσικά υποσυστήματα και ροές, σε πλέγμα έξι πλαισίων: Ζώνη καλλιέργειας, PBR/BLSS κόμβος, ECLSS buffer, Ρομποτική/Actuation, Edge + Digital Twin, Πλήρωμα/Mission Control — καθένα με σύντομη περιγραφή και βέλη ροής μεταξύ τους. Κύρια λογική: οι βιολογικοί κόμβοι δεν λειτουργούν απομονωμένα αλλά μετατρέπονται σε IoST-addressable υποσυστήματα. Χρωματική κωδικοποίηση ανά υποσύστημα, καθαρό φόντο.
Εικόνα 6-8	Κύκλοι λειτουργίας και επίπεδα αυτονομίας Space Farm	Διάγραμμα κύκλων λειτουργίας Space Farm και επιπέδων αυτονομίας με τρεις κυκλικούς κόμβους συνδεδεμένους με βέλη: Ημερήσιος κύκλος (sensing, άρδευση, φωτισμός, PBR monitoring, anomaly scan — L1 κυρίως), Εβδομαδιαίος (συγκομιδή, θρεπτικά, health review, crop schedule — L1–L2), Μηνιαίος (calibration, model update, ground sync, resource audit — L2–L3). Κάτω πλαίσιο «Σχέση L1–L4 και R1–R4»: το L-layer αποφασίζει τη γεωπονική ενέργεια όταν τα δεδομένα είναι αξιόπιστα· το R-layer λειτουργεί εγκάρσια ως ανεξάρτητο watchdog.
Εικόνα 6-9	Διαδρομή επικύρωσης Space Farm: από μοντέλο σε αποστολή	Οριζόντιο διάγραμμα πέντε διαδοχικών σταδίων «Διαδρομή επικύρωσης Space Farm»: SiL (Software-in-the-Loop) → HiL (Hardware-in-the-Loop) → Analog

		(EDEN/SAM-like habitat) → Space demo (ISS/LEO, μικροβαρύτητα) → Mission-ready (Moon/Mars, BLSS-ECLSS integration, resilience gates). Κάθε στάδιο με σύντομη περιγραφή. Κάτω πλαίσιο «Validation gates»: data quality, biological validity, actuator safety, crew workload και δυνατότητα επιστροφής σε ασφαλή λειτουργία.
--	--	---

Η χρήση των παραπάνω εργαλείων περιορίστηκε σε υποστηρικτικό ρόλο και δεν υποκατέστησε την επιστημονική κρίση, την πρωτότυπη συνεισφορά ούτε την ευθύνη του συγγραφέα. Το τελικό περιεχόμενο αντικατοπτρίζει τις δικές του αναλύσεις, επιλογές και συμπεράσματα.

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.