



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

Διαστημικά Συστήματα Υποστήριξης Ζωής Κλειστού
Κύκλου: τεχνολογίες και προοπτικές επίγειων
εφαρμογών

Γιώργος Κ. Προφητηλιώτης

Μεταπτυχιακή Εργασία η οποία υποβάλλεται
για μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
για το Διεπιστημονικό - Διατμηματικό
Δίπλωμα Ειδίκευσης
του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Πολυτεχνείου
"Περιβάλλον και Ανάπτυξη"

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Επιβλέπουσα: Καθηγήτρια Μ. Λοϊζίδου

Περιβάλλον

και

Ανάπτυξη

Επιτροπή Παρακολούθησης:

Καθηγήτρια Μ. Λοϊζίδου
Καθηγήτρια Αικ. Χαραλάμπους
Καθηγητής Κ. Χατζημπίρος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1^η Ιουλίου 2016

.....

Μ. Λοϊζίδου

.....

Αικ. Χαραλάμπους

.....

Κ. Χατζημήτρος

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....
Γεώργιος Κ. Προφητηλιώτης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.
ΜΔΕ «Περιβάλλον και Ανάπτυξη» Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Προφητηλιώτης, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Εκτεταμένη Περίληψη

Ως τώρα, η σχέση της διαστημικής τεχνολογίας με την αιφόρο ανάπτυξη είχε διερευνηθεί μόνο υπό το πρίσμα των δορυφορικών δεδομένων. Μόλις πρόσφατα ήρθε στο προσκήνιο η προοπτική μεταφοράς τεχνολογίας από τα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου σε επίγειες εφαρμογές για την αιφορία. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι, λοιπόν, πρώτον, να αναδείξει το δυναμικό αυτών των επίγειων εφαρμογών των διαστημικών τεχνολογιών υποστήριξης ζωής και, δεύτερον, να υπογραμμίσει τη δυνατότητα ερευνητικής συνέργειας των φορέων που εμπλέκονται στον τομέα του διαστήματος με εκείνους του τομέα της αιφορίας, προκειμένου να διαμορφωθεί μια κοινή στρατηγική ταυτόχρονης ανάπτυξης τεχνολογικών καινοτομιών διττής χρήσης: τόσο για το διάστημα όσο και για τη Γη.

Έτσι, στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται εκτενώς τα βασικά χαρακτηριστικά του διαστημικού περιβάλλοντος που δυσχεραίνουν την επιβίωση του ανθρώπου εκεί, έτσι ώστε να γίνει κατανοητός ο κρίσιμος ρόλος των συστημάτων υποστήριξης ζωής. Έπειτα, περιγράφονται οι λειτουργίες που οφείλει να επιτελεί κάθε τέτοιο σύστημα, με έμφαση στην παροχή οξυγόνου, νερού και τροφής, παράλληλα με την επεξεργασία των μεταβολικών αποβλήτων του πληρώματος. Με βάση αυτή τη λειτουργία διαχείρισης πόρων, παρουσιάζονται οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται αυτά τα συστήματα: η κατηγορία ανοιχτού κύκλου -χωρίς ανακύκλωση πόρων- και η κατηγορία κλειστού κύκλου -με ανακύκλωση πόρων-. Στη συνέχεια, μέσα από μία ανασκόπηση της ιστορικής εξέλιξης των προγραμμάτων των επανδρωμένων διαστημικών πτήσεων, φωτίζονται τα γεγονότα και οι ανάγκες που οδήγησαν στην αλλαγή υποδείγματος από τα συστήματα ανοιχτού κύκλου στα συστήματα κλειστού κύκλου. Τέλος, σημειώνεται, μετά από μία σύγκριση των δύο αυτών υποδειγμάτων, ότι η τελική επιλογή μεταξύ ενός συστήματος υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου και ενός κλειστού κύκλου εξαρτάται καθοριστικά από την απαιτούμενη μάζα προς εκτόξευση και από τη διάρκεια της επανδρωμένης αποστολής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, η εργασία επικεντρώνεται στα συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, τα οποία είναι και τα καταλληλότερα για τις επανδρωμένες διαστημικές αποστολές μακράς διάρκειας. Αρχικά, παρουσιάζονται και περιγράφονται αναλυτικά οι διάφορες τεχνολογίες που αξιοποιούνται στον σχεδιασμό αυτών των συστημάτων, τα επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητάς τους, καθώς και η βασική διάκρισή τους σε φυσικοχημικές και βιολογικές. Μετά από μια συγκριτική επισκόπηση αυτών των δύο διαφορετικών τεχνολογικών οικογενειών, τονίζεται ότι, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που εμφανίζει η κάθε μία, θα ήταν σκόπιμος ο συνδυασμός τους σε υβριδικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, τα οποία θα μπορούσαν να εμφανίζουν σαφώς βελτιωμένα

χαρακτηριστικά από τα αμιγώς φυσικοχημικά ή τα αμιγώς βιολογικά. Τέλος, σημειώνεται πως η ανάπτυξη τέτοιων υβριδικών συστημάτων θα μπορούσε να αποτελέσει τον ενδιάμεσο σταθμό σε ένα στρατηγικό σχέδιο μετάβασης από τα αμιγώς φυσικοχημικά συστήματα στα αμιγώς βιολογικά· θα μπορούσε, δηλαδή, να υποβοηθήσει τη μελλοντική ανάπτυξη τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων και βιοσφαιρών για τον αποικισμό του διαστήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται λόγος για την κατάσταση της γήινης βιόσφαιρας κατά την Ανθρωπόκαινο Εποχή και τονίζεται ο υβριδικός της χαρακτήρας που έχει προκύψει από την εντατική τεχνολογική δραστηριότητα του ανθρώπου. Αυτή η συνειδητοποίηση υποδεικνύει μία χρήσιμη συνάφεια μεταξύ της βιόσφαιρας και των μελλοντικών συστημάτων υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου: αφού το φυσικό περιβάλλον του ανθρώπου είναι, πλέον, υβριδικό, φαίνεται πως η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων υποστήριξης ζωής θα ήταν μια αρκετά δικαιολογημένη στρατηγική. Επιπροσθέτως, φωτίζεται η συνάφεια των μελλοντικών αυτών συστημάτων με τα οικοσυστήματα που είναι κλειστά ως προς την ύλη, προτού συζητηθούν αναλυτικά οι σχετικές πειραματικές εγκαταστάσεις κλειστών οικοσυστημάτων σε Ευρώπη, ΗΠΑ, Ρωσία, Ιαπωνία και Κίνα. Τέλος, σημειώνεται πως, επιπρόσθετα από τους δύο κεντρικούς στόχους αυτών των εγκαταστάσεων που είναι η εξακρίβωση των οικολογικών θεωριών και η ωρίμανση των τεχνολογιών για τα διαστημικά ενδιαφέροντα, υπάρχει μια αξιολογημένη δυνατότητα αξιοποίησης των ερευνητικών τους αποτελεσμάτων και σε πιο πρακτικές επίγειες εφαρμογές.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο, η εργασία επικεντρώνεται στις προοπτικές αξιοποίησης των διαστημικών τεχνολογιών υποστήριξης ζωής που ωριμάζουν στα προαναφερθέντα πειραματικά κλειστά οικοσυστήματα σε δύο ευρύτερους τομείς επίγειων εφαρμογών: στις μεγαπόλεις και στα ακραία περιβάλλοντα. Οι προοπτικές αυτές οφείλονται κυρίως στην ανάγκη ορθολογικής διαχείρισης πόρων που είναι εξαιρετικά επιτακτική τόσο στο διάστημα όσο και στη Γη. Εκτός αυτής της δυνατότητας μεταφοράς τεχνολογίας, όμως, τονίζεται και η εξαιρετική ευκαιρία που ανακύπτει χάρη σε αυτήν την ευθυγράμμιση των στόχων: η ευκαιρία συνεργατικής ανάπτυξης τεχνολογικών καινοτομιών διττής χρήσης που θα μπορούν να προσαρμοστούν τόσο στο διαστημικό όσο και στο επίγειο περιβάλλον. Εν τέλει, συνάγεται το συμπέρασμα πως, αφού ο τελικός στόχος είναι η αιφόρος ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού σε ένα ή περισσότερα ουράνια σώματα, θα ήταν αποδοτικότερο να ακολουθηθεί μία κοινή ερευνητική στρατηγική, στην οποία θα συνεισφέρουν κατάλληλα οι φορείς που εμπλέκονται τόσο με την αιφορία όσο και με την ειρηνική ανάπτυξη του διαστήματος.

Λέξεις-κλειδιά: Διαστημικά Συστήματα Υποστήριξης Ζωής, Αστροναυτική, Τεχνητά Κλειστά Οικοσυστήματα, Βιόσφαιρα, Αειφορία, Μεταφορά Τεχνολογίας.

Extended Abstract

So far, the relation between space technology and sustainable development has only been investigated in the light of satellite data. It is only recently that the opportunity of technology transfer from space closed-loop life support systems to terrestrial applications for sustainability has come to the forefront. Therefore, the aim of this work is, firstly, to highlight the potential of these terrestrial applications of space life support technologies, and, secondly, to underline the possible research synergies between the various stakeholders involved in the field of space technology and in the field of sustainability, which would lead to a common R&D strategy of dual-use technological innovations: both for space and for Earth.

Thus, in the first chapter, the main characteristics of the space environment that endanger human survival are extensively discussed, in order for the critical role of a life support system to be clarified. Then, the required functions of every life support system are described, with an emphasis on the provision of oxygen, water, and food, along with the treatment of the crew's metabolic wastes. As a result of this major resource management function, one can distinguish between two main types of life support systems: the open-loop type -which makes no use of recycling-, and the closed-loop type -which does make use of recycling-. Then, through a review of the historical development of human spaceflight programs, light is shed on the events and novel needs that led to the paradigm shift from the open-loop systems to the closed-loop ones. Finally, it is emphasized -after a comparison of these two paradigms- that the final choice between an open-loop and a closed-loop life support system mainly depends on the required launch mass and the mission duration.

The second chapter focuses on closed-loop life support systems, which are the most suitable for long duration manned space missions. Firstly, a presentation and a detailed description are made of the various technologies that are utilized in the design of these systems, their technology readiness levels, and their basic grouping into the physicochemical and biological families. After a comparative review of these two technological families, it is emphasized that, because of the advantages and disadvantages each one presents, it would be desirable to combine both of them into a hybrid closed-loop life support system, which might present significantly improved characteristics from the purely physicochemical or biological ones. Finally, it is noted that the development of such hybrid systems could also be considered as an intermediate checkpoint of a larger strategic plan for the transition from the purely physicochemical systems to the purely biological ones; a checkpoint that might also be of use in the light of the future development of artificial closed ecosystems and biospheres for the colonization of space.

The third chapter considers the state of the Earth's biosphere during the Anthropocene Era and emphasizes its hybrid character that has emerged as a result of the intensive human technological activities. This realization indicates a useful link between the Earth's biosphere and the future closed-loop life support systems: since the humans' natural environment is currently a hybrid one, it seems that the development of hybrid life support systems might be a fairly sound strategy. Moreover, light is shed on the similarities between these future life support systems and the materially-closed ecosystems, followed by a detailed discussion of the relevant closed ecosystem experimental facilities in Europe, USA, Russia, Japan, and China. Finally, it is noted that, in addition to the two main objectives of these facilities which are the thorough testing of ecological theories and the maturation of space habitat technologies, there is a significant potential to use their research findings in more practical terrestrial applications.

The fourth and final chapter focuses on the potential utilization of the space life support technologies -which get matured in the aforementioned experimental closed ecosystems- for two broad fields of terrestrial applications: the one of megacities and the one of extreme environments. These potential application fields mainly stem from the need for proper resource management which is an imperative both in space and on Earth. Besides these technology transfer opportunities, however, another excellent opportunity arises due to this alignment of goals: the opportunity of a collaborative technological development plan for dual-use innovations that could be adjusted for use both in space and in the terrestrial environment. Finally, it is concluded that, since the ultimate goal is indeed the sustainable development of the human civilization on one or more celestial bodies, it might be more efficient to pursue a joint research strategy, which would result from the appropriate contributions by the various stakeholders involved with sustainability as well as by those involved with the peaceful development of space.

Keywords: Space Life Support Systems, Astronautics, Artificial Closed Ecosystems, Biosphere, Sustainability, Technology Transfer.

Αντί Ευχαριστιών

«Αυτό το μυστικό μου το αποκάλυψε η ίδια η ζωή:
κοίτα, μου είπε, είμαι αυτό που πρέπει πάντα να ξεπερνά τον εαυτό του»

Friedrich Nietzsche

«Η Γη είναι το λίκνο της ανθρωπότητας·
κανείς, όμως, δεν μένει στο λίκνο του για πάντα»

Konstantin Tsiolkovsky

«Οι ιπτάμενες μηχανές που είναι βαρύτερες
από τον αέρα είναι ανέφικτες»

Lord Kelvin (William Thomson)

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|----|
| Εκτεταμένη Περίληψη | 4 |
| Extended Abstract | 6 |
| Αντί Ευχαριστιών..... | 8 |
| Πίνακας Περιεχομένων | 9 |
| Κατάλογος Σχημάτων..... | 11 |
| Κατάλογος Πινάκων..... | 12 |
| Εισαγωγή | 13 |
| Κεφάλαιο 1: Συστήματα Υποστήριξης Ζωής στο Διάστημα..... | 15 |
| 1.1 Ο άνθρωπος στο διαστημικό περιβάλλον..... | 15 |
| 1.2 Απαραίτητες λειτουργίες και κατηγορίες διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής..... | 20 |
| 1.3 Ιστορική εξέλιξη των συστημάτων υποστήριξης ζωής σε διαστημικές αποστολές..... | 24 |
| 1.4 Συγκριτική επισκόπηση συστημάτων υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου και κλειστού κύκλου | 33 |
| 1.5 Βιβλιογραφία..... | 36 |
| Κεφάλαιο 2: Συστήματα Υποστήριξης Ζωής Κλειστού Κύκλου | 37 |
| 2.1 Μέθοδοι και τεχνικές για το κλείσιμο του κύκλου | 37 |
| 2.2 Θεματική παρουσίαση φυσικοχημικών τεχνολογιών υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου..... | 41 |
| 2.3 Θεματική παρουσίαση βιολογικών τεχνολογιών υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου | 58 |
| 2.4 Συγκριτική επισκόπηση των φυσικοχημικών και των βιολογικών τεχνολογιών..... | 67 |
| 2.5 Βιβλιογραφία..... | 69 |
| Κεφάλαιο 3: Τεχνητά Κλειστά Οικοσυστήματα στη Γη | 72 |
| 3.1 Βιόσφαιρα, Ανθρωπόκαινος Εποχή και Τεχνητά Κλειστά Οικοσυστήματα. | 72 |
| 3.2 Πειραματικές εγκαταστάσεις στην Ευρώπη..... | 76 |
| 3.3 Πειραματικές εγκαταστάσεις στις ΗΠΑ | 80 |
| 3.4 Πειραματικές εγκαταστάσεις στη Ρωσία | 83 |
| 3.5 Πειραματικές εγκαταστάσεις στην Ιαπωνία | 86 |
| 3.6 Πειραματικές εγκαταστάσεις στην Κίνα..... | 88 |
| 3.7 Μελλοντικές προοπτικές..... | 91 |
| 3.8 Βιβλιογραφία..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| Κεφάλαιο 4: Επίγειες Εφαρμογές των Τεχνολογιών Υποστήριξης Ζωής..... | 96 |
| 4.1 Διαστημικές τεχνολογίες για την Αειφορία | 96 |
| 4.2 Προοπτικές εφαρμογών στο Οικιστικό Περιβάλλον | 98 |
| 4.3 Προοπτικές εφαρμογών σε Ακραία Περιβάλλοντα | 102 |
| 4.4 Βιβλιογραφία..... | 107 |
| Συμπεράσματα και Προτάσεις για το μέλλον | 111 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1. 1: Μέσοι ημερήσιοι μεταβολικοί ρυθμοί ενός ανθρώπου 75kg. | 19 |
| Σχήμα 1. 2: Αλληλεξαρτήσεις βασικών υποσυστημάτων υποστήριξης ζωής..... | 21 |
| Σχήμα 1. 3: Σύστημα υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου..... | 23 |
| Σχήμα 1. 4: Σύστημα υποστήριξης ζωής μερικώς κλειστού κύκλου..... | 23 |
| Σχήμα 1. 5: Σύστημα υποστήριξης ζωής μερικώς κλειστού κύκλου του ISS..... | 31 |
| Σχήμα 1. 6: Σχετική επίδοση συστημάτων υποστήριξης ζωής ανοιχτού, μερικώς και πλήρως κλειστού κύκλου, σε σχέση με τη διάρκεια μιας διαστημικής αποστολής αναφοράς. | 34 |
| | |
| Σχήμα 2. 1: Κατάταξη ανθρώπινων ενδιατημάτων στο φυσικοχημικό και βιολογικό συνεχές, σύμφωνα με τα συστήματα υποστήριξης ζωής που χρησιμοποιούν..... | 38 |
| Σχήμα 2. 2: Πιθανά στάδια μετάβασης από ένα φυσικοχημικό σε ένα υβριδικό σύστημα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου με την προσθήκη κατάλληλων βιολογικών υποσυστημάτων..... | 39 |
| Σχήμα 2. 3: Πλήρες σχεδιάγραμμα αναφοράς ενός υβριδικού συστήματος υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου του προγράμματος CELSS της NASA..... | 40 |
| Σχήμα 2. 4: Κλίμακα αξιολόγησης του επιπέδου τεχνολογικής ωριμότητας (TRL), σύμφωνα με την στρατηγική ανάπτυξης τεχνολογίας της NASA..... | 48 |
| Σχήμα 2. 5: Πρότυπη δίαιτα για τη μέγιστη κάλυψη των ημερήσιων αναγκών ενός αστροναύτη..... | 63 |
| Σχήμα 2. 6: Σχετική επίδοση αμιγώς φυσικοχημικών, αμιγώς βιολογικών και υβριδικών συστημάτων υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, σε σχέση με τη διάρκεια μιας διαστημικής αποστολής αναφοράς..... | 68 |
| | |
| Σχήμα 3. 1: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση μερικώς ή πλήρως κλειστού οικοσυστήματος σε συνθήκες σταθερής κατάστασης..... | 74 |
| Σχήμα 3. 2: Διαστημική εκδοχή της κλειστής διάταξης CEBAS..... | 77 |
| Σχήμα 3. 3: Διαγραμματική απεικόνιση του κλειστού συστήματος MELISSA..... | 78 |
| Σχήμα 3. 4: Ο θάλαμος παραγωγής βιομάζας -αριστερά- του συστήματος ALSSTB -δεξιά- που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος CELSS..... | 81 |
| Σχήμα 3. 5: Το συγκρότημα των εγκαταστάσεων των επτά συνδεδεμένων μεγακοινοτήτων του τεχνητού κλειστού οικοσυστήματος Biosphere 2..... | 82 |
| Σχήμα 3. 6: Εσωτερικοί χώροι των εγκαταστάσεων του διεθνούς προγράμματος Mars 500 στο IBMP. Γυμναστήριο -πάνω αριστερά-, ιδιωτικό διαμέρισμα -πάνω δεξιά-, κοινόχρηστος χώρος -κάτω αριστερά- και θερμοκήπιο -κάτω δεξιά-..... | 84 |
| Σχήμα 3. 7: Σχέδιο της εγκατάστασης Bios-3 στο Κρασονογιάρσκ της Σιβηρίας. Διαμερίσματα καλλιέργειας ανώτερων φυτών -πάνω αριστερά και δεξιά-, διαμέρισμα καλλιέργειας μικροφυκών -κάτω αριστερά- και διαμέρισμα χώρων πληρώματος -κάτω δεξιά-..... | 85 |
| Σχήμα 3. 8: Αναπαράσταση των υποσυστημάτων της εγκατάστασης CEEF στο Ροκκασό της Ιαπωνίας και ροές ύλης, πληροφορίας και ενέργειας μεταξύ αυτών..... | 88 |
| Σχήμα 3. 9: Τελικό σχέδιο των εγκαταστάσεων του PALACE στο Πεκίνο..... | 90 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 3. 10: Σχέδιο της αρθρωτής πειραματικής εγκατάστασης FLaSH, όπως σχεδιάστηκε και προτάθηκε από το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής..... | 92 |
| Σχήμα 4. 1: Μεταφορά τεχνολογίας μεταξύ διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής και επίγειων εφαρμογών με την πάροδο του χρόνου..... | 97 |
| Σχήμα 4. 2: Διάταξη επεξεργασίας αστικών λυμάτων μικρού όγκου με τη χρήση βιοαντιδραστήρα μικροφυκών. | 99 |
| Σχήμα 4. 3: Σχέδιο αστικής μονάδας κάθετης καλλιέργειας -αριστερά- με λεπτομέρειες ορόφων φυτικής καλλιέργειας -δεξιά πάνω- και ιχθυοκαλλιέργειας -δεξιά κάτω-..... | 102 |
| Σχήμα 4. 4: Βασική δομή συστήματος υποστήριξης ζωής μερικώς κλειστού κύκλου για έναν ερημικό οικισμό | 103 |
| Σχήμα 4. 5: Αναπαράσταση εσωτερικών χώρων του ExoHab1 -αριστερά- και του SHEE -δεξιά-..... | 105 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 2. 1: Φυσικοχημικές τεχνολογίες για ανάκτηση O ₂ στο υποσύστημα διαχείρισης ατμόσφαιρας και εκτίμηση του TRL αυτών. | 47 |
| Πίνακας 2. 2: Φυσικοχημικές τεχνολογίες για ανάκτηση H ₂ O στο υποσύστημα διαχείρισης νερού και εκτίμηση του TRL αυτών. | 54 |
| Πίνακας 2. 3: Φυσικοχημικές τεχνολογίες επεξεργασίας βιολογικών αποβλήτων στο υποσύστημα διαχείρισης αποβλήτων και εκτίμηση του TRL αυτών..... | 57 |
| Πίνακας 2. 4: Βιολογικές τεχνολογίες για τα διάφορα υποσυστήματα υποστήριξης ζωής και εκτίμηση του TRL αυτών. | 66 |

«Βασανίζομαι από ένα αιώνιο δαιμόνιο για πράγματα μακρινά. Λατρεύω να σαλπάρω σε άγνωστες θάλασσες και να πατώ σε βάρβαρες ακτές». Στις δύο αυτές γραμμές ο Χέρμαν Μέλβιλ κατάφερε να αποκρυσταλλώσει τον περίπλοκο ψυχισμό του εξερευνητή: τον ψυχισμό της περιέργειας και της ανακάλυψης, του σθένους και της τόλμης. Αυτή η δάδα του Προμηθέα, που φώτισε τον δρόμο της επιτυχημένης εξάπλωσης του ανθρώπινου είδους σε όλα τα μήκη και τα πλάτη της γης, φούντωσε σαν πυρκαγιά κατά τη διάρκεια της χρυσής «Εποχής των Εξερευνήσεων» και άρχισε να σιγοσβήνει λίγο μετά το τέλος της. Δυο αιώνες αργότερα, σχεδόν κάθε κομμάτι γης κάτω από τη σκέπη του ουρανού είχε ανακαλυφθεί, είχε πατηθεί, είχε απομαγευτεί. Η εξερεύνηση είχε χάσει την εξωτικότητα της, και η ανθρωπότητα την είχε αποτινάξει στο ντουλάπι της ιστορίας, σαν παλιό παιδικό παιχνίδι, γιατί είχε πλέον ανδρωθεί. Στην ομιλία του σχετικά με το εθνικό διαστημικό πρόγραμμα των Η.Π.Α., ο πρόεδρος Κένεντι αποτύπωσε την κοινή γνώμη που προσπαθούσε να μεταστρέψει: «γιατί, λένε κάποιοι, να πάμε στη Σελήνη; γιατί να διαλέξουμε αυτόν τον στόχο;». Φαίνεται πως, ήδη από τη δεκαετία του '60, η ανθρωπότητα δεν είχε απλά ανδρωθεί` είχε κιόλας γεράσει.

Ευτυχώς η κοινή γνώμη μεταστράφηκε. Ευτυχώς, αφού μετά τον απολογισμό αυτής της προσελήνωσης το ισοζύγιο αποδείχθηκε, τελικά, θετικό. Τι κερδίσαμε, όμως, σπάζοντας τα γήινα δεσμά της βαρύτητας και το άπιαστο όριο της ατμόσφαιρας; Κερδίσαμε, φυσικά, την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, τον εμπλουτισμό της επιστημονικής γνώσης, την εμπειρία από τις επιτυχίες και τις αποτυχίες του πιο μεγαλεπήβολου εγχειρήματος στην ιστορία της ανθρωπότητας. Το σημαντικότερο που κερδίσαμε, όμως, ήταν η πρόσβαση σε ένα νέο ανέγγιχτο περιβάλλον άφθονων προοπτικών. Κι έτσι, η προπατορική φλόγα αναζωπυρώθηκε, και, με όριο πλέον τον ουρανό, ξεκίνησε η εποχή της πρώιμης εμπορικής αξιοποίησης και της ειρηνικής ανάπτυξης του διαστήματος. Χάρη στις απαιτήσεις μηδενικής αστοχίας που επιβάλλει η δριμύτητα του διαστημικού περιβάλλοντος, προέκυψαν, και συνεχίζουν να προκύπτουν με εκθετικό ρυθμό, αποτελεσματικότερες καινοτομίες υψηλής τεχνολογίας, οι οποίες αναπτύχθηκαν για το διάστημα αλλά διαχέονται και στη Γη. Οι καινοτομίες αυτές δεν προορίζονται μόνο για την επίλυση των σοβαρών επίγειων προβλημάτων -όπως ο βιολογικός καθαρισμός λυμάτων και τα φωτοβολταϊκά-, αλλά έχουν ήδη εισχωρήσει στην αγορά των καταναλωτικών προϊόντων καθημερινής χρήσης -όπως οι συμπυκνωμένες βρεφικές τροφές, τα κεραμικά ορθοδοντικά σιδεράκια και οι λαμπτήρες LED-. Φαίνεται, δηλαδή, πως η ανάπτυξη του διαστήματος δεν άνοιξε απλά τις προοπτικές για την εμπορική είσοδο σε εντελώς νέες αγορές

-όπως λ.χ. σε αυτήν των δορυφορικών επικοινωνιών-, αλλά επέφερε μια αλυσιδωτή έκρηξη καινοτομίας στις ήδη υπάρχουσες, μέσω της μεταφοράς τεχνογνωσίας. Φράσεις όπως «το διάστημα είναι η ύστατη start-up» υποδηλώνουν αυτήν την αφθονία προοπτικών που εκτιμούν οι αναλυτές. Το μερίδιό τους από αυτό το κέρασ της Αμάλθειας θα μπορούσαν, μελλοντικά,

να διεκδικήσουν και αρκετοί φορείς που δραστηριοποιούνται στον χώρο της ανάπτυξης τεχνολογιών για την αειφορία· δοθείσης, φυσικά, μιας στρατηγικής επένδυσής τους σε αυτούς τους επιστημονικούς τομείς των επιστημών και των τεχνολογιών του διαστήματος και, πιο συγκεκριμένα, στις τεχνολογίες των συστημάτων υποστήριξης ζωής που χρησιμοποιούνται στις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις.

Σκοπός αυτής της εργασίας, λοιπόν, είναι, από τη μία, να αναδειχθούν αυτές οι τεχνολογίες υποστήριξης ζωής, με έμφαση στις τεχνολογίες κλειστού κύκλου, να φωτιστεί η σημασία τους για την επανδρωμένη εξερεύνηση του διαστήματος και, από την άλλη, να υπογραμμιστούν οι προοπτικές για τις διάφορες επίγειες εφαρμογές τους, που εκτείνονται από την πειραματική μελέτη της γήινης βιόσφαιρας έως την ορθολογική διαχείριση των χρησιμοποιούμενων πόρων. Η διαστημική επιστήμη και τεχνολογία έχει αποδείξει στο παρελθόν τον ρηξικέλευθο χαρακτήρα της και την καταλυτική της επίδραση στη γένεση της καινοτομίας· μιας καινοτομίας που δεν περιορίζεται στον τομέα του διαστήματος, αλλά διασπείρεται και στους υπόλοιπους τομείς της οικονομίας, επιφέροντας αποδοτικές αλλαγές υποδείγματος στις συνήθεις πρακτικές, αλλά και νέα προϊόντα και υπηρεσίες για την κάλυψη ανθρώπινων αναγκών και την άμβλυση δυσεπίλυτων προβλημάτων. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία τονίζεται ιδιαίτερα και η εξαιρετική ευκαιρία της από κοινού ανάπτυξης καινοτομιών διττού χαρακτήρα: τόσο για την υποστήριξη ζωής των αστροναυτών στο διάστημα όσο και για την αειφόρο διαβίωση των ανθρώπων στη Γη. Βεβαίως, με μία διορατική ματιά στο προλεχθέν, μπορεί εύκολα κανείς να συνάγει τον απώτερο στόχο μιας τέτοιας έρευνας διττού χαρακτήρα: τη διαφύλαξη του ανθρώπινου πολιτισμού σε ένα ή περισσότερα ουράνια σώματα. Γιατί, όπως έγραψε κάποτε και ο Καρλ Σέιγκαν, η εξερεύνηση και η ανάπτυξη του διαστήματος ενσαρκώνει κάτι πολύ πιο πεζό και ρεαλιστικό από έναν ρομαντικό ζήλο: ενσαρκώνει την εξασφάλιση της επιβίωσης.

Κεφάλαιο 1: Συστήματα Υποστήριξης Ζωής στο Διάστημα

1.1 Ο άνθρωπος στο διαστημικό περιβάλλον

Το διαστημικό περιβάλλον είναι γενικά εχθρικό τόσο στον τεχνολογικό εξοπλισμό όσο και στους ανθρώπους. Από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του περιβάλλοντος, δηλαδή τις συνθήκες μειωμένης βαρύτητας, τα υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας, το κενό, τους μικρομετεωροειδείς και τα τροχιακά συντρίμια, τα δύο πρώτα αποτελούν τους αναπόφευκτους παράγοντες επιβάρυνσης της υγείας και της φυσιολογίας των αστροναυτών σε κάθε επανδρωμένη διαστημική αποστολή (Norberg, 2013).

Αναφορικά με τις συνθήκες μειωμένης βαρύτητας, οι αστροναύτες υφίστανται διαφορετικές τιμές επιτάχυνσης βαρύτητας (g) ανάλογα με τον τόπο όπου συντελείται η αποστολή στην οποία συμμετέχουν. Επί παραδείγματι, η επιτάχυνση της βαρύτητας που βίωσαν οι αστροναύτες στην επιφάνεια της Σελήνης ήταν $1.67m/s^2$, δηλαδή το 17% της γήινης, ενώ αυτή που θα βιώσουν σε μια μελλοντική αποστολή στην επιφάνεια του Άρη θα είναι $3.73m/s^2$, δηλαδή το 38% της γήινης. Ειδικά στις περιπτώσεις των επανδρωμένων διαπλανητικών αποστολών, δηλαδή πέρα από τα 35786km από την επιφάνεια της Γης της γεωστατικής περιφέρειας τροχιάς (Geostationary Orbit, GSO), αλλά και του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού (International Space Station, ISS), δηλαδή στα 400km από την επιφάνεια της Γης της χαμηλής περιφέρειας τροχιάς (Low Earth Orbit, LEO), επικρατούν συνθήκες μικροβαρύτητας. Στην περίπτωση του ISS, συγκεκριμένα, η αίσθηση της επίπλευσης (weightlessness) που βιώνουν οι αστροναύτες δεν οφείλεται σε μηδενισμό της επιτάχυνσης της βαρύτητας, αλλά στην κατάσταση ελεύθερης πτώσης στην οποία βρίσκονται μονίμως όλα τα αντικείμενα που κινούνται σε περιφέρειες τροχιές (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Αυτή η κατάσταση επίπλευσης που επικρατεί στο μικροβαρυτικό διαστημικό περιβάλλον επηρεάζει, όπως ήταν αναμενόμενο, τη φυσιολογία όλων των ζωντανών οργανισμών που έχουν εξελιχθεί στο επίγειο βαρυτικό περιβάλλον του 1 g. Μόλις βρεθεί στο διαστημικό μικροβαρυτικό περιβάλλον, το ανθρώπινο σώμα υφίσταται μια σειρά από νευρο-αισθητηριακές, καρδιαγγειακές και μυοσκελετικές αλλαγές που το βοηθούν να προσαρμοστεί σε αυτήν τη νέα κατάσταση ισορροπίας (Clément, 2011) (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Περισσότεροι από τους μισούς αστροναύτες που έχουν βρεθεί σε μικροβαρυτικό περιβάλλον έχουν βιώσει τη ναυτία του διαστήματος (space motion sickness) ή το σύνδρομο προσαρμογής στο διάστημα (space adaptation syndrome) με συμπτώματα ζαλάδες και εμετούς. Αυτές οι επιπλοκές φαίνεται πως προκαλούνται από την παρερμηνεία των αλληλοσυγκρουόμενων αισθητηριακών και κιναισθητικών σημάτων από τον εγκέφαλο, η οποία οφείλεται στην παρακώλυση της φυσιολογικής λειτουργίας του αιθουσαίου συστήματος στο εσωτερικό του αυτιού εξαιτίας της μικροβαρύτητας. Μετά από μερικές μέρες στο διάστημα, ο εγκέφαλος μαθαίνει να ερμηνεύει σωστά τα ερεθίσματα που λαμβάνει από το νέο περιβάλλον του, και το αιθουσαίο σύστημα έρχεται σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας, οδηγώντας έτσι τα προηγούμενα ανεπιθύμητα συμπτώματα σε εξάλειψη (Clément, 2011) (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Επιπροσθέτως, αυτή η κατάσταση επίπλευσης προκαλεί μια ανακατανομή των ενδοαγγειακών και εξωαγγειακών υγρών από τα κάτω άκρα του σώματος των αστροναυτών προς το κεφάλι τους. Ο ομοιοστατικός μηχανισμός του ανθρώπινου σώματος προσαρμόζεται σε αυτήν την απότομη αύξηση της πίεσης στα ανώτερα άκρα με αύξηση της παραγόμενης ποσότητας ούρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική μείωση των υγρών του σώματος, που οδηγεί σε μια συρρίκνωση του καρδιακού μυός έως και 10%, αλλά και της διαμέτρου των αιμοφόρων αγγείων, εξαιτίας του ελαττωμένου όγκου αίματος στο κυκλοφορικό σύστημα. Το κυκλοφορικό σύστημα προσαρμόζεται τελικά σε αυτές τις νέες συνθήκες με μια αύξηση του καρδιακού ρυθμού (Clément, 2011) (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Τέλος, στο μικροβαρυτικό περιβάλλον η σπονδυλική στήλη υφίσταται μια επιμήκυνση αρκετών εκατοστών, εξαιτίας της απουσίας της φυσιολογικής βαρυτικής συμπίεσης των μεσοσπονδύλιων δίσκων, η οποία μπορεί να καταστεί αρκετά επίπονη για τους αστροναύτες. Εκτός αυτού, τα υπόλοιπα οστά και οι μύες των αστροναυτών ατροφούν με την πάροδο του χρόνου, εξαιτίας της απουσίας του φόρτου βάρους σε αυτό το περιβάλλον. Η μεγαλύτερη απώλεια μυϊκής μάζας συμβαίνει συνήθως κατά τη διάρκεια του πρώτου μήνα, ενώ η οστεοπόρωση ξεκινά με αργό ρυθμό ήδη από την πρώτη εβδομάδα και επιταχύνεται σταδιακά με την πάροδο των μηνών, με μέση τιμή ρυθμού απώλειας ασβεστίου που αγγίζει το 0.5% ανά μήνα. Η μεγαλύτερη απώλεια ασβεστίου παρατηρείται στα υποστηρικτικά οστά και, αντίθετα με τις αλλοιώσεις της νευρο-αισθητηριακής και καρδιαγγειακής φυσιολογίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν μετριάζεται αυτόματα από κάποιον ομοιοστατικό μηχανισμό του ανθρώπινου σώματος. Παράλληλα με το ασβέστιο, όμως, ελαττώνεται και ο μυελός των οστών, προκαλώντας στους αστροναύτες τη λεγόμενη διαστημική αναιμία (space anemia) και, συνεπακόλουθα, μια μείωση των T-λεμφοκυττάρων. Μάλιστα, αυτή η εξασθένιση του ανοσοποιητικού συστήματος δύναται να υποσκάψει την άμυνα των αστροναυτών ενάντια σε πιθανές καρκινογενέσεις, οι οποίες

ευνοούνται ιδιαίτερα από τις συνθήκες υψηλών επιπέδων ακτινοβολίας που επικρατούν στο διαστημικό περιβάλλον και θα παρουσιαστούν εκτενέστερα ευθύς αμέσως (Clément, 2011) (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Οποιοδήποτε αντικείμενο στο διάστημα βομβαρδίζεται διαρκώς από δύο είδη ακτινοβολιών: την ιονίζουσα ακτινοβολία και τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία. Η ιονίζουσα ακτινοβολία αποτελείται από σωματίδια και κύματα που φέρουν αρκετή ενέργεια ώστε να ιονίσουν τα άτομα και τα μόρια με τα οποία αλληλεπιδρούν. Αυτού του τύπου η ακτινοβολία είναι η πιο διατηρητική από τα δύο είδη και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς μπορεί να επιφέρει τη μεγαλύτερη ζημιά τόσο στον υλικό εξοπλισμό όσο και στους ανθρώπινους ιστούς. Στο διαστημικό περιβάλλον που βρίσκεται κοντά στη Γη, οι αστροναύτες έρχονται σε επαφή με τρεις κυρίαρχες πηγές ιονίζουσας ακτινοβολίας: τα σωματίδια από ηλιακά γεγονότα, τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες και τις ζώνες Van Allen (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Τα σωματίδια από ηλιακά γεγονότα, δηλαδή από ηλιακές εκλάμψεις ή ηλιακές στεμματικές εκτινάξεις μάζας, είναι κυρίως πρωτόνια, ηλεκτρόνια ή βαρείς ατομικοί πυρήνες, τα οποία επιταχύνονται σε στάθμες ενέργειας που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες MeV. Αν και η εμφάνιση μεμονωμένων τέτοιων γεγονότων είναι αδύνατον να προβλεφθεί, εντούτοις η συχνότητά τους ακολουθεί τον 11-ετή ηλιακό κύκλο και, στο μέγιστο αυτού του κύκλου, μπορεί να οδηγήσει σε μια χιλιαπλάσια αύξηση των επιπέδων ακτινοβολίας στον διαστημικό χώρο. Ένα πολύ ισχυρό τέτοιο ηλιακό γεγονός, μάλιστα, συνέβη μεταξύ των διαστημικών αποστολών Apollo 16 και 17· αν οποιαδήποτε από τις δύο αποστολές προσσελήνωσης συνέπιπτε με το γεγονός αυτό, τότε οι αστροναύτες θα δέχονταν υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, επικίνδυνες για την υγεία τους (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες προέρχονται από πηγές εκτός του ηλιακού μας συστήματος και αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια· κατά βάση πρωτόνια, πυρήνες ηλίου και πυρήνες βαρέων ιόντων, όπως, για παράδειγμα, πυρήνες σιδήρου. Τα σωματίδια αυτά οφείλουν την επιτάχυνσή τους κυρίως σε εκρήξεις μακρινών υπερκαινοφανών αστέρων, γι' αυτό και οι ενεργειακές τους στάθμες κυμαίνονται από μερικές δεκάδες MeV έως μερικές δεκάδες GeV, γεγονός το οποίο τις καθιστά εξαιρετικά διατηρητικές. Ο 11-ετής ηλιακός κύκλος επηρεάζει τη ροή αυτών των σωματιδίων δια μέσου του ηλιακού μας συστήματος μειώνοντας τον αριθμό τους κατά τη διάρκεια του μεγίστου της ηλιακής δραστηριότητας. Τα σωματίδια των γαλαξιακών κοσμικών ακτινών φέρουν, μεν, πολλαπλάσια κινητική ενέργεια από αυτά των ηλιακών γεγονότων, υστερούν, δε, ως προς τη συνολική ροή τους σε σχέση με αυτά, γι' αυτό και δεν είναι τόσο απειλητικά για την υγεία των αστροναυτών. Υπολογίζεται πως μόνο ένα ποσοστό 5-10% της συνολικής δόσης ακτινοβολίας που δέχονται οι αστροναύτες στον διαστημικό χώρο οφείλεται στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες. Εντούτοις, οι ακτίνες αυτές, εξαιτίας της

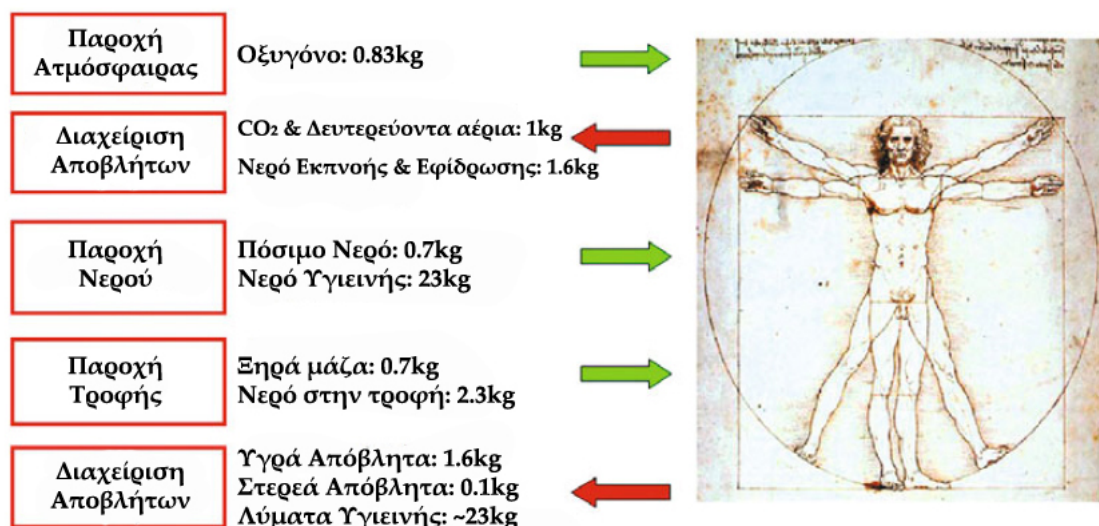
εξαιρετικής διατηρητικής τους ικανότητας, είναι αδύνατον να αναχαιτιστούν, και οι αστροναύτες τις υφίστανται σε μόνιμη βάση. Αυτή η αναπόφευκτη προσλαμβανόμενη ποσότητα ονομάζεται και δόση ακτινοβολίας υποβάθρου (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Οι ζώνες Van Allen είναι δύο ομόκεντρες τοροειδείς χωρικές ζώνες εντός της γήινης μαγνητόσφαιρας που εμπεριέχουν παγιδευμένα σωματίδια υψηλών ενεργειών και περικλείουν τις περιοχές μεταξύ των δύο γήινων μαγνητικών πόλων. Η εσωτερική ζώνη Van Allen εκτείνεται από 500km έως 2 γήινες ακτίνες από την επιφάνεια της Γης και εμπεριέχει ενεργητικά πρωτόνια, με επίπεδα ενέργειας που κυμαίνονται στα 0.1-100MeV, και ηλεκτρόνια, με επίπεδα ενέργειας που κυμαίνονται στα 1-10MeV. Η εξωτερική ζώνη εκτείνεται στην περιοχή μεταξύ 3 και 9 γήινων ακτινών από την επιφάνεια και εμπεριέχει ένα μείγμα ιόντων και, κυρίως, ενεργητικά πρωτόνια. Τα σωματίδια που παγιδεύονται από το γήινο μαγνητικό πεδίο στις ζώνες Van Allen προέρχονται είτε από την ηλιακή δραστηριότητα, στην περίπτωση της εξωτερικής ζώνης, είτε από την αλληλεπίδραση της ανώτερης γήινης ατμόσφαιρας με την κοσμική ακτινοβολία. Έτσι, επόμενο είναι οι πληθυσμοί των παγιδευμένων σωματιδίων που ταλαντώνονται μεταξύ των μαγνητικών πόλων της γης σε αυτές τις δύο ζώνες να επηρεάζονται από τον 11-ετή ηλιακό κύκλο. Οι πληθυσμοί της εσωτερικής ζώνης μεγιστοποιούνται στο ελάχιστο του κύκλου, ενώ της εξωτερικής στο μέγιστο αυτού. Αυτές οι δύο ζώνες, και κυρίως η εσωτερική που τέμνεται με την τροχιά του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού, αποτελούν μια σημαντική πηγή ακτινοβολίας που επιβαρύνει τόσο τον ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό όσο και τους ιστούς των αστροναυτών (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Η συνδυασμένη πρόσληψη ιονίζουσας ακτινοβολίας των τριών παραπάνω πηγών από τους αστροναύτες στον διαστημικό χώρο δύναται να προκαλέσει δύο ειδών προβλήματα στον οργανισμό τους: οξείες επιπλοκές και χρόνιες επιπλοκές. Οι οξείες επιπλοκές εμφανίζονται συνήθως μέσα σε λίγες μέρες και οφείλονται σε σύντομης διάρκειας έκθεση του οργανισμού σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Τα συμπτώματα που εμφανίζουν οι αστροναύτες είναι η ναυτία και ο εμετός, που συνοδεύονται από ενοχλήσεις, απώλεια όρεξης για φαγητό και κόπωση. Μάλιστα, σε πολύ υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, τα παραπάνω συμπτώματα ακολουθούνται από διάρροια, αιμορραγία και απώλεια μαλλιών μετά από μία λανθάνουσα περίοδο έως και δύο εβδομάδων. Από την άλλη, οι χρόνιες επιπλοκές εμφανίζονται συνήθως μετά από αρκετά έτη και οφείλονται σε μακροχρόνια έκθεση του οργανισμού σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Τα συμπτώματα αυτά περιλαμβάνουν καρκίνο του πνεύμονα, του στήθους, του γαστρεντερικού συστήματος, αλλά και λευχαιμία. Η πιθανότητα να αναπτύξει ένας αστροναύτης τερματική μορφή καρκίνου, μάλιστα, αυξάνεται κατά 2-5% για κάθε 0.5J/kg ακτινοβολίας που δέχεται κατά τη διάρκεια της καριέρας του. Ένας αστροναύτης στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό δέχεται σε περίοδο έξι μηνών

80-160mJ/kg ακτινοβολίας. Συγκριτικά, η μέση ετήσια έκθεση σε ακτινοβολία για έναν άνθρωπο στην επιφάνεια της Γης είναι 3.5mJ/kg (Clément, 2011) (Norberg, 2013) (Eckart, 1996).

Μέσα σε αυτό το περιβάλλον μικροβαρύτητας και υψηλών επιπέδων ακτινοβολίας, οι αστροναύτες καλούνται όχι μόνο να επιβιώσουν αλλά και να διατηρήσουν τον οργανισμό τους σε άψογη λειτουργική κατάσταση, φυσική και ψυχολογική, προκειμένου να καταφέρουν να περατώσουν με επιτυχία τις εκάστοτε επιστημονικές αποστολές που τους έχουν ανατεθεί. Ένας άνθρωπος μπορεί να επιβιώσει μόλις τέσσερα λεπτά χωρίς οξυγόνο, τρεις ημέρες χωρίς νερό και τριάντα ημέρες χωρίς τροφή. Στη Γη, οι βασικές ανθρώπινες ανάγκες της κατάλληλης ατμόσφαιρας, του νερού, της τροφής και της απομάκρυνσης των αποβλήτων καλύπτονται με φυσικό τρόπο από τις οικοσυστημικές υπηρεσίες που προσφέρει η βιόσφαιρα του πλανήτη στο διάστημα, αν και μακριά από τα επίγεια οικολογικά συστήματα, αυτές οι ανάγκες παραμένουν αμετάβλητες. Οι βασικές απαιτήσεις για την εξασφάλιση της ανθρώπινης ευεξίας στο διαστημικό περιβάλλον καθορίζονται κατά περίπτωση από τους μεταβολικούς ρυθμούς που χαρακτηρίζουν αυτές τις ανάγκες σε κάθε άνθρωπο. Κατά μέσο όρο, ένας άνθρωπος μάζας 75kg χρειάζεται ετησίως το τετραπλάσιο της μάζας του σε οξυγόνο, το τριπλάσιο σε τροφή και το δεκαεπταπλάσιο σε πόσιμο νερό, ενώ για την υγιεινή του χρησιμοποιεί εκατόν είκοσι επτά φορές τη μάζα του σε νερό τα ετήσια παραγόμενα απόβλητα του μεταβολισμού του -στερεά, υγρά και αέρια- είναι της τάξεως των 11400kg. Οι μέσοι ημερήσιοι μεταβολικοί ρυθμοί για έναν άνθρωπο 75kg φαίνονται στο **Σχήμα 1.1** (Clément, 2011) (Skoog, 2013) (Eckart, 1996).



Σχήμα 1. 1: Μέσοι ημερήσιοι μεταβολικοί ρυθμοί ενός ανθρώπου 75kg. Προσαρμογή από (Skoog, 2013)

Οι ανάγκες αυτές, βέβαια, εξαρτώνται άμεσα και από τη διάρκεια της εκάστοτε διαστημικής αποστολής. Η παροχή ατμόσφαιρας κατάλληλης για αναπνοή θα πρέπει, φυσικά, να παρέχεται στους αστροναύτες σε κάθε περίπτωση· παράλληλα, το αργότερο μετά από μερικές ώρες, θα πρέπει να εξασφαλίζεται και η απομάκρυνση του CO₂. Από την άλλη, η παροχή νερού, αλλά και η διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων, κρίνεται απαραίτητη μόνο για αποστολές που διαρκούν περισσότερο από έξι ώρες. Τέλος, η τροφή θεωρείται βασική ανάγκη των αστροναυτών μόνο σε διαστημικές αποστολές διάρκειας μεγαλύτερης της μίας ημέρας (Skoog, 2013).

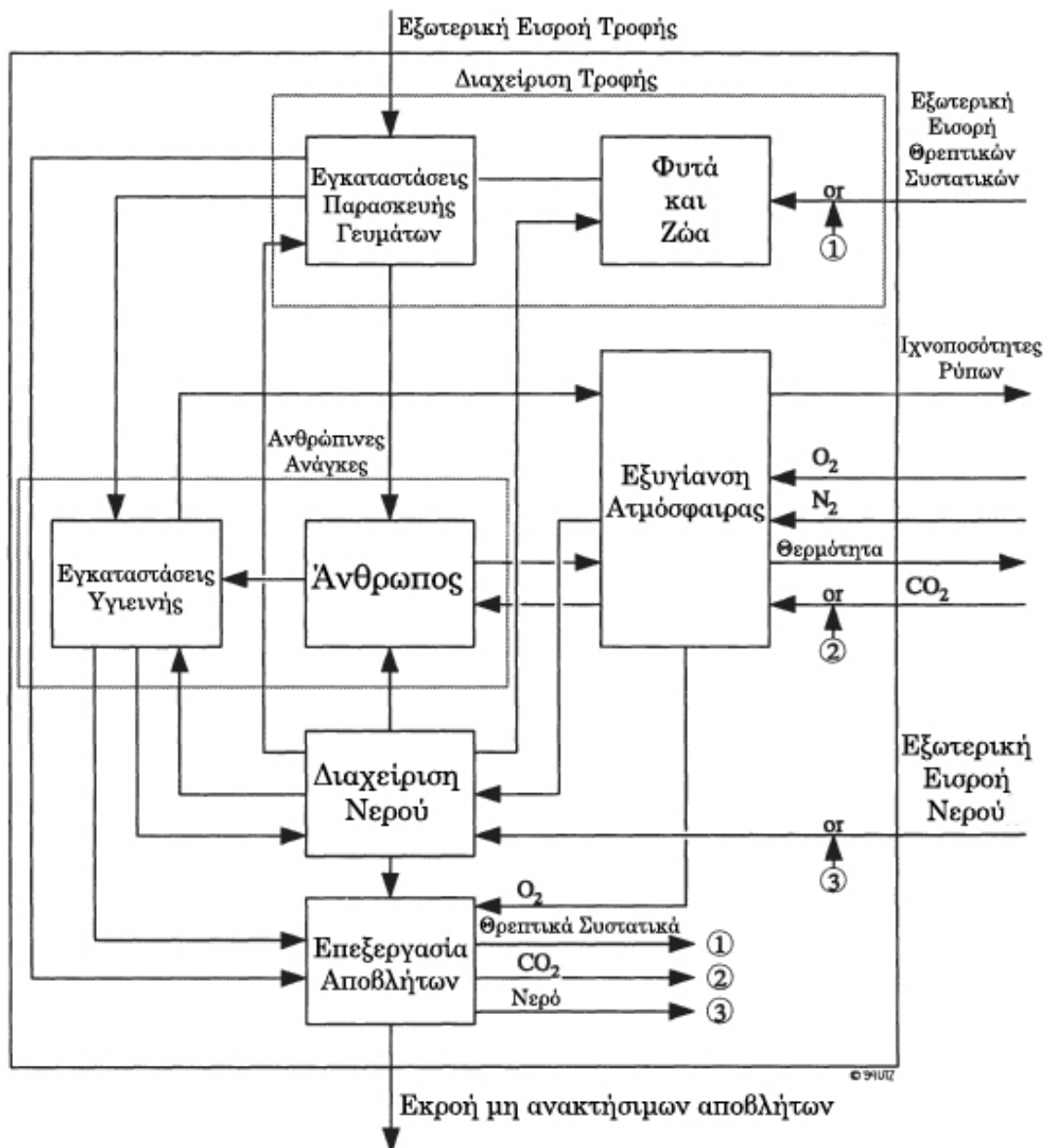
Παρά τις εχθρικές συνθήκες που επικρατούν στο διαστημικό περιβάλλον, όμως, η διαστημική μηχανική αντιμετωπίζει τα παραπάνω ζητήματα με τις κατάλληλες τεχνικές και τεχνολογίες ακτινοπροστασίας, ενδυνάμωσης της φυσικής κατάστασης των αστροναυτών και, φυσικά, υποστήριξης ζωής που είναι και το κεντρικό θέμα της **Ενότητας 1.2**.

1.2 Απαραίτητες λειτουργίες και κατηγορίες διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής

Από τη σκοπιά της θερμοδυναμικής, ο άνθρωπος είναι ένα ανοιχτό σύστημα· ανταλλάσσει μάζα και ενέργεια με το περιβάλλον του για να διατηρήσει τη δομή του. Όπως όλοι οι γήινοι οργανισμοί, ο άνθρωπος έχει προσαρμοστεί εξελικτικά στη γήινη βιόσφαιρα και μπορεί να επιβιώσει μόνο όταν οι παράμετροι του περιβάλλοντός του, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία και η σύσταση της ατμόσφαιρας, κινούνται εντός συγκεκριμένων ορίων. Στις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις, όμως, οι αστροναύτες απομακρύνονται από αυτό το περιβάλλον. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η υποκατάσταση αυτού με τη χρήση τεχνητών συστημάτων, τα οποία θα παρέχουν στους αστροναύτες -και, πιθανόν, σε άλλους συνοδευτικούς οργανισμούς- τη βιολογική τους αυτονομία σε απομόνωση από το φυσικό τους περιβάλλον, τη γήινη βιόσφαιρα. Τα τεχνητά συστήματα που παρέχουν στο πλήρωμα ενός διαστημικού σκάφους, ενός διαστημικού σταθμού ή μιας διαστημικής βάσης ένα ελεγχόμενο, διατηρήσιμο και φυσιολογικά αποδεκτό περιβάλλον ονομάζονται Συστήματα Υποστήριξης Ζωής (Life Support Systems, LSS) (Eckart, 1996) (Yamashita & Wheeler, 2014).

Οι λειτουργίες που οφείλει να επιτελεί κάθε σύστημα υποστήριξης ζωής χωρίζονται σε τρεις ευρύτερους τομείς: στον έλεγχο περιβάλλοντος, στη διαχείριση πόρων και αποβλήτων και στη διασφάλιση ποιότητας ζωής. Ο τομέας ελέγχου περιβάλλοντος περιλαμβάνει τις λειτουργίες ελέγχου σύστασης, πίεσης, θερμοκρασίας, υγρασίας και κυκλοφορίας της

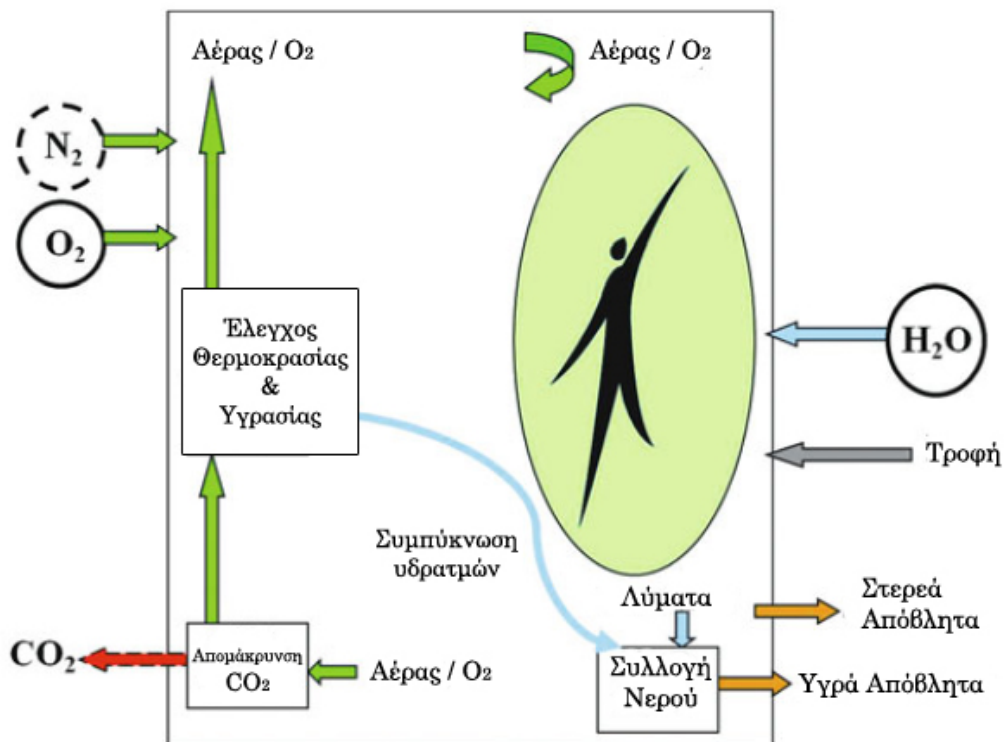
ατμόσφαιρας της καμπίνας, ελέγχου ποιότητας πόσιμου νερού και νερού υγιεινής, ελέγχου επιπέδων φωτισμού, ελέγχου επιπέδων θορύβου, ελέγχου επιπέδων ακτινοβολίας, ελέγχου μικροβιολογικού περιβάλλοντος και επιπέδων ρύπων, παροχής πυρασφάλειας και, μελλοντικά, παροχής τεχνητής βαρύτητας. Ο τομέας διαχείρισης πόρων περιλαμβάνει τις λειτουργίες παροχής οξυγόνου, παροχής νερού, παροχής τροφής και διαχείρισης αποβλήτων. Τέλος, ο τομέας διασφάλισης ποιότητας ζωής περιλαμβάνει τις λειτουργίες αποθήκευσης και παρασκευής γευμάτων, της διαχείρισης του ρουχισμού, της αρχιτεκτονικής της καμπίνας, της παροχής ιατρικής υποστήριξης και της παροχής ψυχολογικής και κοινωνικής υποστήριξης (Eckart, 1996) (Yamashita & Wheeler, 2014).



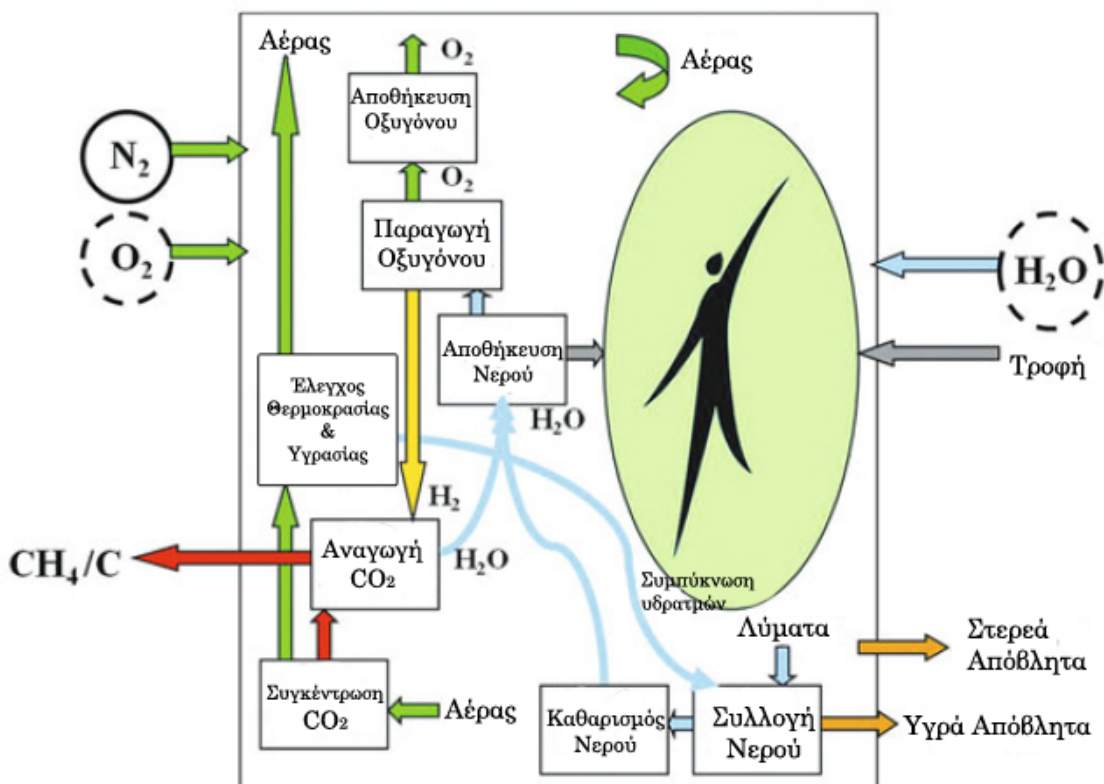
Σχήμα 1. 2: Αλληλεξαρτήσεις βασικών υποσυστημάτων υποστήριξης ζωής. Προσαρμογή από (Eckart, 1996)

Στον σχεδιασμό των συστημάτων υποστήριξης ζωής, εξέχουσα σημασία είναι ο ορισμός των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των διαφόρων υποσυστημάτων που επιτελούν τις προαναφερθείσες λειτουργίες. Φυσικά, κεντρικό υποσύστημα κάθε συστήματος υποστήριξης ζωής αποτελεί και ο άνθρωπος με τις μεταβολικές του ανάγκες. Παραπάνω, στο **Σχήμα 1.2**, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα των τεσσάρων βασικών υποσυστημάτων της διαχείρισης ατμόσφαιρας, νερού, τροφής και αποβλήτων και των αλληλεπιδράσεών τους με το ανθρώπινο υποσύστημα. Στο σχήμα αυτό, φαίνεται ότι είναι εφικτό το κλείσιμο των κύκλων του CO₂, των θρεπτικών συστατικών και του νερού, αν υιοθετηθούν κατάλληλες τεχνολογίες επεξεργασίας των παραγόμενων αποβλήτων. Παρ' όλα αυτά, όμως, εξαιτίας των διαρροών και των μη ιδανικών διεργασιών που εμπλέκονται σε αυτά τα υποσυστήματα, η συνεχής εκροή θερμότητας, ιχνοποσοτήτων ρύπων και μη ανακτήσιμων αποβλήτων θα ήταν μάλλον δύσκολο να αποφευχθεί. Για τον λόγο αυτό, και για την αναπλήρωση και τη διατήρηση των απαιτούμενων συγκεντρώσεων των απαραίτητων χημικών στοιχείων εντός του συστήματος υποστήριξης ζωής, η εξωτερική εισροή ποσοτήτων O₂, N₂ και τροφής θα ήταν, τουλάχιστον για την ώρα, αναπόφευκτη (Eckart, 1996).

Όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, υπάρχουν δύο θεμελιώδεις προσεγγίσεις στη σχεδίαση των συστημάτων υποστήριξης ζωής: η προσέγγιση ανοιχτού κύκλου (*non-regenerative, open loop*) και η προσέγγιση κλειστού κύκλου (*regenerative, closed loop*). Στην πρώτη κατηγορία συστημάτων υποστήριξης ζωής, που είναι και η απλούστερη, οι απαραίτητοι πόροι οξυγόνου, αζώτου, νερού και τροφής αποθηκεύονται στο διαστημικό σκάφος πριν την εκτόξευσή του από τη Γη ή παράγονται στο διάστημα ως παραπροϊόν κάποιας άλλης διεργασίας, όπως για παράδειγμα το νερό ως προϊόν της χρήσης κυψελών καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας. Τα δε αέρια, υγρά και στερεά απόβλητα απορρίπτονται από το σκάφος στο διάστημα ή συλλέγονται και αποθηκεύονται για να επιστραφούν στη Γη. Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται συστήματα ανοιχτού κύκλου, προκειμένου να υπογραμμιστεί η διαρκής εισροή και εκροή μάζας διαμέσου αυτών. Ένα διάγραμμα συστήματος υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.3**. Στη δεύτερη κατηγορία συστημάτων υποστήριξης ζωής, επιδιώκεται μερικό ή πλήρες κλείσιμο ενός ή περισσότερων εκ των παρακάτω κύκλων: του κύκλου του νερού, του κύκλου του οξυγόνου και του κύκλου της τροφής. Το κλείσιμο αυτών των κύκλων αποσκοπεί στην ανακύκλωση και στην ανάκτηση πόρων από τα παραγόμενα απόβλητα, έτσι ώστε οι αρχικές προμήθειες που αποθηκεύονται στο διαστημικό σκάφος πριν την εκτόξευσή του από τη Γη να παραμένουν εντός του συστήματος υποστήριξης ζωής και να μειωθεί η ανάγκη για εξωτερική ανατροφοδοσία. Ένα διάγραμμα συστήματος υποστήριξης ζωής μερικώς κλειστού κύκλου με κλείσιμο των κύκλων του νερού και του οξυγόνου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.4** (Clément, 2011) (Skoog, 2013).



Σχήμα 1. 3: Σύστημα υποστήριξης ζωής ανοικτού κύκλου. Προσαρμογή από (Skoog, 2013)



Σχήμα 1. 4: Σύστημα υποστήριξης ζωής μερικής κλειστού κύκλου. Προσαρμογή από (Skoog, 2013)

Καθώς το 70% της μάζας ανατροφοδοσίας ενός συστήματος υποστήριξης ζωής είναι νερό και το 20% αυτής είναι οξυγόνο και άζωτο, έπεται ότι ένα μερικώς κλειστό σύστημα υποστήριξης ζωής, όπως αυτό που απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.4**, θα μπορούσε, μέσω του κλεισίματος των κύκλων του νερού και του οξυγόνου, να επιτύχει μείωση της αναγκαίας μάζας ανατροφοδοσίας κατά 90%. Η μετάβαση από ένα μερικώς σε ένα πλήρως κλειστό και αυτόνομο σύστημα υποστήριξης ζωής, όμως, απαιτεί επιπλέον και το κλείσιμο του κύκλου της τροφής, το οποίο, αν και θα μπορούσε να συνεισφέρει σημαντικά με την παροχή φρέσκων φυτικών προϊόντων στην ευεξία των αστροναυτών, είναι ένα αρκετά δύσκολο και κοστοβόρο τεχνολογικό βήμα (Skoog, 2013).

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου και κλειστού κύκλου θα εξεταστούν αναλυτικότερα στην **Ενότητα 1.4**. Στην **Ενότητα 1.3**, που ακολουθεί ευθύς αμέσως, θα παρουσιαστεί μια επισκόπηση της ιστορικής εξέλιξης των συστημάτων υποστήριξης ζωής από τις πιο πρώιμες μορφές ανοιχτού κύκλου έως τις πιο πρόσφατες που λειτουργούν με μερικώς κλειστό κύκλο.

1.3 Ιστορική εξέλιξη των συστημάτων υποστήριξης ζωής σε διαστημικές αποστολές

Ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η λειτουργία συστημάτων υποστήριξης ζωής στις διαστημικές αποστολές των τελευταίων πενήντα ετών οδήγησε στη σταδιακή τους ωρίμανση και εξέλιξη από τα πρώιμα συστήματα ανοιχτού κύκλου -στις αποστολές Vostok, Voskhod, Mercury και Gemini- στα πιο πρόσφατα συστήματα μερικώς κλειστού κύκλου -Mir και ISS-. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πρώτοι αστροναύτες που δοκίμασαν τα εμβρυακά ακόμη συστήματα υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου δεν ήταν άνθρωποι. Ο πρώτος ανώτερος οργανισμός που τοποθετήθηκε σε περίγεια τροχιά ήταν ο θηλυκός σκύλος Laika πάνω στον Σοβιετικό Sputnik 2 το 1957. Το σύστημα υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου της Laika ήταν ένας ερμητικά σφραγισμένος κλιματιζόμενος θάλαμος που περιείχε τροφή και νερό. Το σύστημα αυτό είχε σχεδιαστεί να διαρκέσει για επτά ημέρες, όμως η Laika πέθανε πέντε με επτά ώρες μετά την εκτόξευση, εξαιτίας κάποιας βλάβης που οδήγησε τον θάλαμό της σε υπερθέρμανση. Λίγο αργότερα, το 1959, οι ΗΠΑ δοκίμασαν τα συστήματα της αποστολής Mercury με τέσσερις μαϊμούδες και χιμπατζήδες. Το σύστημα υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου αυτών των ζώων αποτελούταν από παλέτες Ca(OH)_2 και Ba(OH)_2 για την απορρόφηση του CO_2 , ενώ το οξυγόνο για αναπνοή ήταν αποθηκευμένο σε κύλινδρο υπό πίεση. Διάφορες στρώσεις μονωτικών υλικών παρείχαν μερικό έλεγχο

θερμοκρασίας, ενώ η απομάκρυνση της υγρασίας από την ατμόσφαιρα της καμπίνας γινόταν με απορρόφηση των υδρατμών από πορώδες υλικό. Τροφή και νερό δεν παρεχόταν στα ζώα του πληρώματος, ενώ για τη διαχείριση των μεταβολικών αποβλήτων τους είχαν χρησιμοποιηθεί απλά πάνες. Αυτές οι δοκιμαστικές πτήσεις βοήθησαν στη συλλογή πολύτιμων βιομετρικών δεδομένων από τα ζώα στο διαστημικό περιβάλλον, διανοίγοντας, έτσι, τον δρόμο για την πρώτη επανδρωμένη διαστημική πτήση του Yuri Gagarin το 1961 (Clément, 2011) (Eckart, 1996) (Skoog, 2013) (Grahn & Norberg, 2013) (Macdonald, et al., 2014).

Vostok (1960-1963): Ο Yuri Gagarin, ο πρώτος άνθρωπος που ετέθη σε περίγεια τροχιά, χρησιμοποίησε το διαστημικό σκάφος Vostok 1. Η καμπίνα του σοβιετικού Vostok 1 είχε όγκο 2-3m³ και μπορούσε να φιλοξενήσει μόνο έναν κοσμοναύτη. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του Vostok ήταν ανοιχτού κύκλου. Εντός της καμπίνας του, παρεχόταν ατμόσφαιρα με σύσταση παρόμοια με της Γης, αλλά ο κοσμοναύτης φορούσε επιπλέον μια εξειδικευμένη διαστημική στολή για περισσότερη ασφάλεια. Η στολή δεν είχε δικές της λειτουργίες υποστήριξης ζωής, πέραν της ελεγχόμενης παροχής O₂, αλλά ήταν μερικώς ενσωματωμένη στην ατμόσφαιρα της καμπίνας, οπότε η απομάκρυνση του CO₂ γινόταν μέσω χημικής αντίδρασης του με παλέτες KOH που παρέχονταν από την καμπίνα. Η κυκλοφορία της ατμόσφαιρας μέσα στη στολή, ο έλεγχος της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των οσμών γινόταν επίσης από τα κατάλληλα υποσυστήματα στην καμπίνα. Η παροχή νερού γινόταν με καλαμάκι που υπήρχε μέσα στη στολή. Η παροχή τροφής δεν είχε ενσωματωθεί στο σύστημα υποστήριξης ζωής του Vostok 1, ενώ η διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων περιοριζόταν απλά σε συλλογή και αποθήκευση αυτών στο σκάφος. Ο Yuri Gagarin περάτωσε με επιτυχία την αποστολή του και επέστρεψε στη Γη μετά από 108 λεπτά στο διάστημα (Eckart, 1996) (Skoog, 2013).

Mercury (1960-1963): Παράλληλα με τα διαστημικά σκάφη του προγράμματος Vostok της Σοβιετικής Ένωσης, αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ το πρόγραμμα Mercury. Η καμπίνα του Mercury ήταν κωδονόσχημη και μπορούσε να φιλοξενήσει μόνο έναν κοσμοναύτη στα 1.56m³ του ωφέλιμου όγκου της. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του ήταν, όπως και του Vostok, ανοιχτού κύκλου και απαρτιζόταν από τα υποσυστήματα της καμπίνας και από την εξειδικευμένη διαστημική στολή που φορούσε ο κοσμοναύτης. Αντίθετα με το Vostok, το υποσύστημα της διαστημικής στολής του Mercury ήταν επιφορτισμένο με την εξυγίανση της ατμόσφαιρας για την αναπνοή του κοσμοναύτη με τη χρήση LiOH για την απομάκρυνση του CO₂, όπως επίσης και με τον έλεγχο της υγρασίας και τον έλεγχο της θερμοκρασίας του σώματος του κοσμοναύτη. Τα υποσυστήματα της καμπίνας αναλάμβαναν μόνο την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας καθαρού οξυγόνου εντός της καμπίνας και τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της πίεσης της καμπίνας. Η παροχή τροφής δεν είχε ενσωματωθεί, ενώ υπήρχε πρόβλεψη για παροχή μικρής ποσότητας

νερού. Το σύστημα διαχείρισης αποβλήτων περιοριζόταν στα υγρά μεταβολικά απόβλητα, τα οποία συλλέγονταν και αποθηκεύονταν σε εσωτερική δεξαμενή της διαστημικής στολής και επιστρέφονταν στη Γη. Ο πρώτος κοσμοναύτης που χρησιμοποίησε το διαστημικό σκάφος Mercury ήταν ο Alan Shepard, μία εβδομάδα μετά την πτήση του Yuri Gagarin (Eckart, 1996) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Voskhod (1964-1965): Το σοβιετικό διαστημικό σκάφος Voskhod 1 ήταν μια μετεξέλιξη των Vostok. Η άκατος του ήταν σφαιρική και ο ωφέλιμος όγκος της καμπίνας του ήταν ίδιος με αυτόν των Vostok, αλλά με καλύτερη διαρρύθμιση του χώρου. Προκειμένου να μεταφέρει τρεις κοσμοναύτες στον ίδιο όγκο, το Voskhod 1 έγινε το πρώτο διαστημικό σκάφος στο οποίο το πλήρωμα δεν χρειαζόταν να φοράει εξειδικευμένη διαστημική στολή. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του ήταν και πάλι ανοιχτού κύκλου και ήταν το ίδιο με αυτά των Vostok. Το Voskhod 1 έγινε το πρώτο διαστημικό σκάφος που περιείχε στο πλήρωμά του έναν ιατρό. Το Voskhod 2 έγινε το πρώτο διαστημικό σκάφος που επέτρεψε σε έναν κοσμοναύτη, τον Alexei Leonov, να βγει -με τη χρήση εξειδικευμένης διαστημικής στολής- στο διάστημα, με την κατάλληλη προσθήκη ενός θαλάμου αποσυμπίεσης στην άκατο του Voskhod 1. Αυτά τα δύο σκάφη εκτέλεσαν με επιτυχία δεκαέξι και δεκαεπτά περιγίες περιφορές αντίστοιχα, πριν επιστρέψουν στη Γη (Eckart, 1996) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Gemini (1964-1966): Το αμερικανικό διαστημικό σκάφος Gemini προέκυψε από βελτιώσεις στον προκάτοχό του, το διαστημικό σκάφος Mercury. Η άκατος του ήταν μεγαλύτερη και μπορούσε να μεταφέρει δύο κοσμοναύτες στα 2.26m³ του ωφέλιμου όγκου της καμπίνας του. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του Gemini ήταν ανοιχτού κύκλου, ίδιο με του Mercury, και διακλαδιζόταν στα υποσυστήματα της καμπίνας και των εξειδικευμένων διαστημικών στολών που φορούσαν τα μέλη του πληρώματος. Οι βελτιώσεις στο σύστημα αποθήκευσης οξυγόνου και στην ενσωμάτωση των υποσυστημάτων ελέγχου θερμοκρασίας και υγρασίας μείωσαν την κατασπατάληση όγκου και ωφέλιμου φορτίου και αύξησαν την αξιοπιστία του συστήματος. Αντίθετα με το Mercury, όμως, τα υγρά μεταβολικά απόβλητα των κοσμοναυτών δεν αποθηκεύονταν για να επιστραφούν στη Γη, αλλά εισάγονταν σε έναν λέβητα συμπύκνωσης με σκοπό την αποβολή θερμότητας στο διάστημα. Τα στερεά μεταβολικά απόβλητά τους, τέλος, συλλέγονταν σε πλαστικές σακούλες και αποθηκεύονταν για να επιστραφούν στη Γη (Eckart, 1996) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Soyuz (1967-Σήμερα): Το σοβιετικό διαστημικό σκάφος Soyuz σχεδιάστηκε αρχικά να φιλοξενεί ένα πλήρωμα τριών ατόμων στα 10m³ του ωφέλιμου όγκου του για διαστημικές αποστολές μέγιστης διάρκειας επτά ημερών. Αντίθετα με τα προηγούμενα διαστημικά σκάφη, το Soyuz είχε δύο καμπίνες, μία για την καθημερινή ζωή και την εργασία του πληρώματος και

μία για την επιστροφή του πληρώματος στη Γη. Στα πρώτα Soyuz, το πλήρωμα δεν φορούσε διαστημικές στολές. Μετά από ένα θανάσιμο ατύχημα στο Soyuz 11, όμως, αποφασίστηκε η μείωση του πληρώματος από τρία σε δύο άτομα, έτσι ώστε να είναι εφικτό να φορούν οι κοσμοναύτες τις διαστημικές στολές ασφαλείας τους μέσα στην καμπίνα. Στην πιο πρόσφατη εκδοχή του Soyuz, στο Soyuz TMA-M, ο ωφέλιμος όγκος έχει αυξηθεί, μετά από επανασχεδιασμό της διαρρύθμισης του εσωτερικού χώρου, για να μπορεί να συντηρήσει τρεις κοσμοναύτες με πλήρη εξάρτυση διαστημικών στολών. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του Soyuz είναι ανοιχτού κύκλου και σε μεγάλο βαθμό απαράλλαχτο από εκείνα των Vostok και Voskhod. Η καμπίνα του έχει σχεδιαστεί να είναι ερμητικά σφραγισμένη, έτσι ώστε να μην υπάρχουν διαρροές αερίων. Η απομάκρυνση του CO₂ γίνεται μέσω χημικής αντίδρασης του με φυσίγγια KOH, κυρίως, και, δευτερευόντως, LiOH. Υπάρχει, επίσης, αποθηκευμένο πόσιμο νερό που διατίθεται στο πλήρωμα, αλλά και σύστημα περισυλλογής των μεταβολικών αποβλήτων τους, παρόμοιο με εκείνο του Vostok. Το Soyuz χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν για τη μεταφορά πληρώματος από και προς τον διαστημικό σταθμό Mir, αλλά χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για τη μεταφορά πληρώματος από και προς τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (Eckart, 1996) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Apollo (1968-1972): Το διαστημικό σκάφος του αμερικανικού προγράμματος Apollo είχε σκοπό να μεταφέρει τον πρώτο άνθρωπο στη Σελήνη, γι' αυτό και εμπεριείχε δύο συστήματα υποστήριξης ζωής, τα οποία ήταν και πάλι ανοιχτού κύκλου: ένα στην καμπίνα ελέγχου και ένα στην καμπίνα προσσελήνωσης. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του Apollo ήταν το ίδιο με εκείνα των Mercury και Gemini και ήταν διαμοιρασμένο στα υποσυστήματα καμπίνας και στα υποσυστήματα της εξειδικευμένης διαστημικής στολής των αστροναυτών. Ο ωφέλιμος όγκος της καμπίνας ελέγχου ήταν 5.9m³ και μπορούσε να φιλοξενήσει τρεις αστροναύτες με τις στολές τους. Το σύστημα υποστήριξης ζωής της καμπίνας ελέγχου ήταν σχεδιασμένο να λειτουργήσει για δεκατέσσερις ημέρες και είχε τη δυνατότητα παραγωγής μέρους του πόσιμου νερού που καταλάωναν οι αστροναύτες, μέσω της χρήσης κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνταν για την ενεργειακή τροφοδοσία του σκάφους. Τα υγρά μεταβολικά απόβλητα των αστροναυτών απορρίπτονταν από την καμπίνα ελέγχου στο διάστημα, ενώ τα στερεά μεταβολικά απόβλητα συλλέγονταν σε πλαστικές σακούλες και αποθηκεύονταν στο διαστημικό σκάφος. Αντίθετα, το σύστημα υποστήριξης ζωής της καμπίνας προσσελήνωσης μπορούσε να φιλοξενήσει μόνο δύο αστροναύτες σε ωφέλιμο όγκο 4.5m³, παρείχε μόνο εκ των προτέρων αποθηκευμένο πόσιμο νερό και δεν επέτρεπε την απόρριψη των αποβλήτων στη Σελήνη, αλλά τα αποθήκευε σύμφωνα με τους κανονισμούς πλανητικής προστασίας. Η δέσμευση του CO₂ γινόταν και στις δύο καμπίνες με φυσίγγια LiOH. Στο πρόγραμμα Apollo συμμετείχαν είκοσι τέσσερις αστροναύτες. Οι δώδεκα εξ αυτών περπάτησαν στη Σελήνη, με πρώτο τον Neil Armstrong του Apollo 11 και τελευταίο τον Harrison Schmitt του Apollo 17. Μετά το πέρας

των αποστολών Apollo, όλες οι επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις έως και σήμερα περιορίζονται στην περιοχή της χαμηλής περιγείας τροχιάς (Low Earth Orbit, LEO), γεγονός το οποίο καθιστά τη Σελήνη τον πιο απομακρυσμένο προορισμό που έχει επισκεφθεί ποτέ ο άνθρωπος (Eckart, 1996) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Salyut Space Stations (1971-1982): Τα σοβιετικά διαστημικά σκάφη του προγράμματος Salyut σχεδιάστηκαν για μακράς διάρκειας διαστημικές αποστολές και αποτέλεσαν τους πρώτους διαστημικούς σταθμούς. Τα σκάφη αυτά μπορούσαν να φιλοξενήσουν ένα πενταμελές πλήρωμα σε συνολικό ωφέλιμο όγκο 100m^3 . Το σύστημα υποστήριξης ζωής στην πρώτη γενιά αυτών των διαστημικών σταθμών ήταν ανοιχτού κύκλου και παρόμοιο με αυτό των Soyuz, μόνο που δεν ήταν αναγκαία η χρήση της διαστημικής στολής από το πλήρωμα μέσα στις καμπίνες. Όμως, από το 1977 και έπειτα, στη δεύτερη γενιά -Salyut 6 και 7- εισήχθη για πρώτη φορά η καινοτομία της ανάκτησης και εξυγίανσης νερού. Η καινοτομία αυτή προέκυψε από την πρόθεση για μακροχρόνια κατοίκηση των αστροναυτών σε διαστημικό σταθμό σε περίγεια τροχιά, για πρώτη φορά στην ιστορία των επανδρωμένων διαστημικών πτήσεων. Η νέα προσθήκη στο σύστημα υποστήριξης ζωής ήταν ένα κύκλωμα ανάκτησης νερού για την παραγωγή πόσιμου νερού από συμπύκνωση και εξυγίανση της υγρασίας στην ατμόσφαιρα της καμπίνας. Η εξυγίανση γινόταν σε ένα φυσικοχημικό σύστημα πολυεπίπεδου φιλτραρίσματος, το οποίο εμπεριείχε, συν τοις άλλοις, ρητίνες ιοντοεναλλαγής και ενεργό άνθρακα. Στο κύκλωμα αυτό υπήρχε και ένα τελευταίο στάδιο προσθήκης μετάλλων στο νερό μετά το φιλτράρισμα, κλείνοντας, έτσι, μερικώς τον κύκλο του νερού στο σύστημα υποστήριξης ζωής. Η διαχείριση του CO_2 γινόταν, όπως και στα προηγούμενα σοβιετικά διαστημικά σκάφη, με τη χρήση φυσιγγίων KOH και LiOH , ενώ τόσο τα υγρά όσο και τα στερεά μεταβολικά απόβλητα των αστροναυτών απλά συλλέγονταν και απορρίπτονταν από το σκάφος στο διάστημα. Η μεταφορά των αστροναυτών από και προς τους Διαστημικούς Σταθμούς Salyut γινόταν με τα διαστημικά σκάφη Soyuz, ενώ η μεταφορά φορτίων γινόταν με μια μη επανδρωμένη εκδοχή των Soyuz που ονομάστηκε Progress. Οι Διαστημικοί Σταθμοί Salyut 6 και Salyut 7 κατοικήθηκαν από δεκαέξι και δέκα διαφορετικά πληρώματα για, συνολικά, 676 και 812 ημέρες αντίστοιχα (Eckart, 1996) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Skylab Space Station (1973-1974): Το διαστημικό σκάφος Skylab ήταν ο πρώτος αμερικανικός διαστημικός σταθμός και ταυτόχρονα το μεγαλύτερο διαστημικό σκάφος που έχει μπει ποτέ σε τροχιά με μόνο μία εκτόξευση. Στον ωφέλιμο όγκο των 361m^3 του μπορούσε να φιλοξενήσει ένα τριμελές πλήρωμα, χωρίς τη χρήση διαστημικών στολών, το οποίο ήταν επιφορτισμένο με την εκτέλεση πληθώρας επιστημονικών πειραμάτων σε συνθήκες επίπλευσης. Το Skylab ήταν το πρώτο διαστημικό σκάφος που παρείχε στους αστροναύτες τη δυνατότητα να κάνουν μπάνιο σε ντουζιέρα,

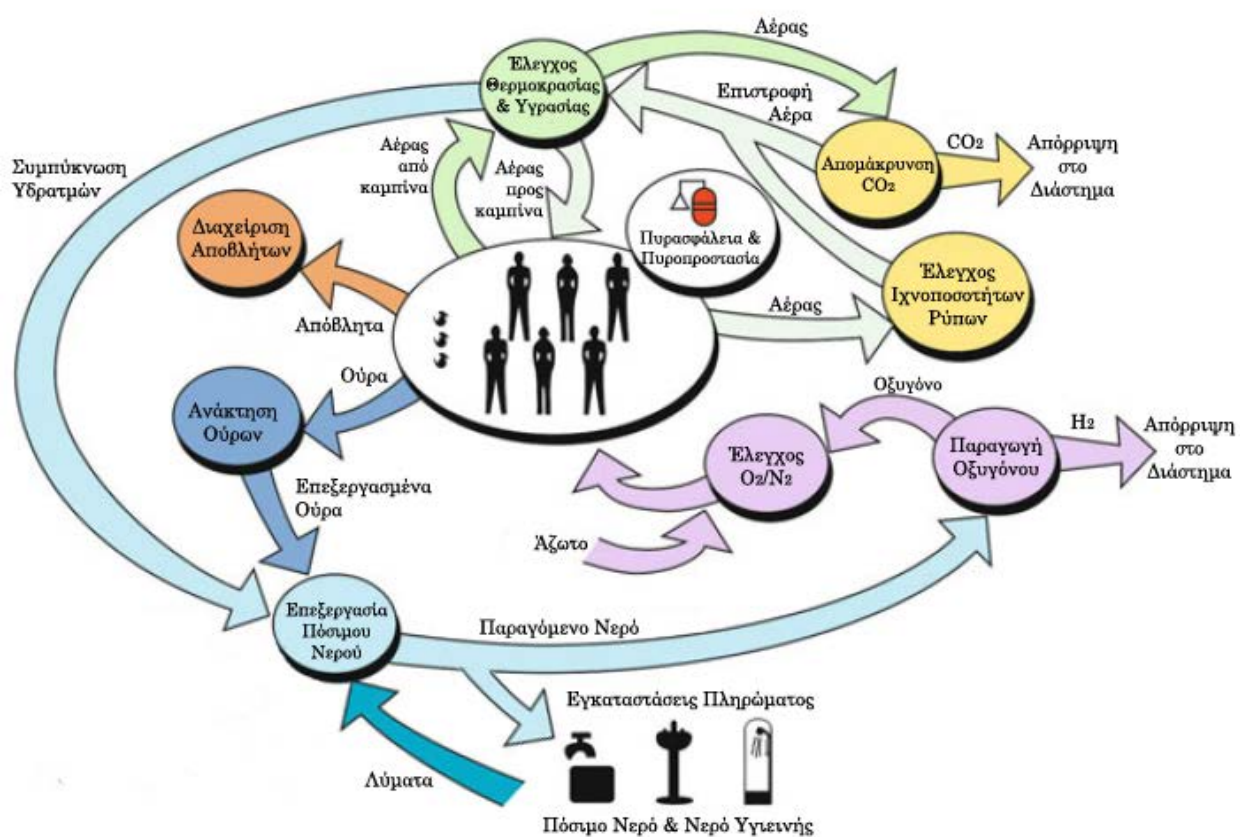
καθώς οι προμήθειες αποθηκευμένου νερού έφταναν τα 2700kg. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του ήταν και πάλι ανοιχτού κύκλου. Για την απομάκρυνση του CO₂ από το μείγμα N₂ και O₂ της ατμόσφαιρας στις καμπίνες των αστροναυτών, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η τεχνολογία του μοριακού κόσκινου, το οποίο αντικατέστησε τα παλαιότερα φυσίγγια LiOH. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούσε φυσίγγια ζεόλιθου, τα οποία πετύχαιναν ταυτόχρονα τη δέσμευση τόσο του CO₂ όσο και της υγρασίας. Τα υγρά μεταβολικά απόβλητα του πληρώματος συλλέγονταν και απορρίπτονταν από το σκάφος στο διάστημα, τα στερεά μεταβολικά απόβλητα συλλέγονταν και αποθηκεύονταν στο σκάφος, ενώ βελτιώθηκε και η ποικιλία των παρεχόμενων τροφών, οι οποίες περιλάμβαναν πλέον κονσερβοποιημένα, κατεψυγμένα, αλλά και φρέσκα προϊόντα. Οι τρεις αποστολές στο Skylab διήρκησαν είκοσι οκτώ, πενήντα εννέα και ογδόντα τέσσερις ημέρες έκαστη, αποδεικνύοντας ότι ήταν εφικτή η παραμονή σε τροχιά για πολύ περισσότερες από είκοσι τέσσερις ημέρες, που ήταν ο μέγιστος χρόνος παραμονής των κοσμοναυτών στα σοβιετικά διαστημικά σκάφη (Eckart, 1996) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Space Shuttle (1981-2011): Το Διαστημικό Λεωφορείο (Space Shuttle) ήταν ένα αμερικανικό διαστημικό σκάφος που ακολούθησε το πρόγραμμα Apollo και ήταν σχεδιασμένο να φιλοξενεί ένα επταμελές πλήρωμα για αποστολές διάρκειας επτά ημερών στα 74m³ του συνολικού ωφέλιμου όγκου του. Σκοπός του ήταν να μειώσει το κόστος της πρόσβασης στο διάστημα με συχνές πτήσεις και επαναχρησιμοποιούμενες ακάτους και τμήματα των συστημάτων εκτόξευσής του. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του ήταν ανοιχτού κύκλου. Η δέσμευση του CO₂ από το μείγμα N₂ και O₂ της ατμόσφαιρας του διαστημικού σκάφους γινόταν χρησιμοποιώντας, συμπληρωματικά με την παραδοσιακή μέθοδο των φυσιγγίων LiOH, στερεές αμίνες, δηλαδή ένα μητρώο ρητίνης ιοντοεναλλαγής παραγόμενο από πολυμερισμό ρητινών που εμπεριέχουν αμινομάδες. Πόσιμο νερό παρέχονταν στο πλήρωμα τόσο από τις αποθηκευμένες προμήθειες όσο και από την καύση του υδρογόνου των κυψελών καυσίμου. Αν και τα υγρά απόβλητα των αστροναυτών συλλέγονταν και απορρίπτονταν στο διάστημα, τα στερεά απόβλητα για πρώτη φορά μπορούσαν να συλλεχθούν και να αποθηκευθούν για να επιστραφούν στη Γη μέσω μίας εξειδικευμένης διαστημικής τουαλέτας που αντικατέστησε τις απλές πλαστικές σακούλες των παλιότερων αποστολών. Η τροφή που παρέχονταν στους αστροναύτες ήταν αποθηκευμένη στο σκάφος μαζί με τις υπόλοιπες προμήθειες. Τα διάφορα Διαστημικά Λεωφορεία περάτωσαν με επιτυχία εκατόν τριάντα πέντε αποστολές και χρησιμοποιήθηκαν, μεταξύ άλλων, για την εκτέλεση επιστημονικών πειραμάτων σε κατάσταση επίπλευσης στην επιπρόσθετη καμπίνα της διαστημικής μονάδας Spacelab, αλλά και για τη σταδιακή συναρμολόγηση και, μετέπειτα, εξυπηρέτηση του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού (Eckart, 1996) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Mir Space Station (1986-2001): Ο σοβιετικός διαστημικός σταθμός Mir είχε σχεδιαστεί να φιλοξενήσει εξαμελή πληρώματα, χωρίς διαστημικές στολές, σε έναν ωφέλιμο όγκο περίπου 380m^3 και ήταν ο πρώτος διαστημικός σταθμός που επέτρεπε τη μεγέθυνσή του μετά από προσθήκη επιπλέον διαστημικών τμημάτων. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του ήταν μερικώς κλειστού κύκλου και έμοιαζε σε μεγάλο βαθμό με εκείνο του Διαστημικού Σταθμού Salyut 7, αν και είχε υποστεί ορισμένες βελτιωτικές αλλαγές. Όπως και στα άλλα σοβιετικά διαστημικά σκάφη, η απορρόφηση του CO_2 γινόταν με τη χρήση φυσιγγίων KOH και LiOH , ενώ υπήρχε και η δυνατότητα παραγωγής οξυγόνου στο σκάφος μέσω ηλεκτρόλυσης υδρατμών. Η τεχνική αυτή οδήγησε σε μία διασύνδεση των κύκλων του οξυγόνου και του νερού. Στον Mir για πρώτη φορά δοκιμάστηκε με επιτυχία ένα βελτιωμένο μερικό κλείσιμο του κύκλου του νερού με τη χρήση τριών ανεξάρτητων κυκλωμάτων ανάκτησης και εξυγίανσης, μέσω φιλτραρίσματος πολλαπλών σταδίων. Το πρώτο κύκλωμα ήταν παρόμοιο με εκείνο της δεύτερης γενιάς των Salyut και μετέτρεπε την υγρασία της ατμόσφαιρας της καμπίνας σε πόσιμο νερό. Το δεύτερο κύκλωμα χρησιμοποιούσε την ίδια μέθοδο για την εξυγίανση και την ανακύκλωση του νερού υγιεινής, αποκλειστικά για χρήση του σε δραστηριότητες υγιεινής. Το τρίτο κύκλωμα ανακτούσε νερό από τα υγρά μεταβολικά απόβλητα των αστροναυτών, μέσω διάχυσης, απόσταξης και φιλτραρίσματος των υδρατμών τους, το οποίο τροφοδοτούσε τη διάταξη ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή οξυγόνου. Μετά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, η εναπομένουσα άλμη που εμπειριείχε τα στερεά υπολείμματα των ούρων έπρεπε να συλλεχθεί σε δεξαμενές και να επιστραφεί στη Γη με το μη επανδρωμένο διαστημικό σκάφος Progress. Για τα στερεά μεταβολικά απόβλητα των αστροναυτών, στον Mir γινόταν χρήση μιας εξειδικευμένης διαστημικής τουαλέτας, αντίστοιχης με εκείνη των Διαστημικών Λεωφορείων. Τα στερεά μεταβολικά απόβλητα, μαζί με τα στερεά υπολείμματα των τροφών, συγκεντρώνονταν και απορρίπτονταν επίσης στο διαστημικό σκάφος Progress. Κάθε έξι μήνες, το διαστημικό σκάφος Progress ανεφοδίαζε τον Mir με συμπληρωματικό πόσιμο νερό, τροφές και αέριο άζωτο, αφού η ατμόσφαιρά του αποτελούταν από ένα μείγμα N_2 και O_2 , παρόμοιο με εκείνο της γήινης. Ο Διαστημικός Σταθμός Mir φιλοξένησε κατά τη διάρκεια των δεκαπέντε ετών της ζωής του εκατόν είκοσι πέντε ανθρώπους -μεταξύ των οποίων και απλούς πολίτες- από δώδεκα διαφορετικά κράτη και χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή 23000 επιστημονικών και ιατρικών πειραμάτων (Eckart, 1996) (Grahm & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

International Space Station (1998-Σήμερα): Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (International Space Station, ISS) είναι η μεγαλύτερη κατασκευή που έχει δημιουργηθεί ποτέ σε περίγεια τροχιά και, ταυτόχρονα, το μεγαλύτερο πολυεθνικό συνεργατικό έργο στην ιστορία της ανθρωπότητας. Ο ISS είναι περισσότερο από τέσσερις φορές μεγαλύτερος από τον Mir και στα 1200m^3 του συνολικού ωφέλιμου όγκου του μπορεί να φιλοξενήσει έως και έξι αστροναύτες για ονομαστική διάρκεια αποστολής ενενήντα ημερών. Η

ατμόσφαιρα που παρέχεται στο πλήρωμα αποτελείται από ένα μείγμα N_2 και O_2 , παρόμοιο με εκείνο της γήινης, με φυσιολογική πίεση μιας γήινης ατμόσφαιρας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ISS κατοικείται από αστροναύτες αδιαλείπτως από το 2000 μέχρι και σήμερα. Το αρκετά εξελιγμένο σύστημα υποστήριξης ζωής του ISS είναι μερικώς κλειστού κύκλου και έχει τη δυνατότητα να ανακυκλώνει σχεδόν όλο το οξυγόνο και το νερό που καταναλώνεται από τους αστροναύτες, ενώ έχουν ήδη ξεκινήσει και προσπάθειες καλλιέργειας τροφής εντός των δωματίων του. Ένα εποπτικό διάγραμμα του συστήματος υποστήριξης ζωής μερικώς κλειστού κύκλου του ISS φαίνεται στο **Σχήμα 1.5** (Clément, 2011) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).



Σχήμα 1. 5: Σύστημα υποστήριξης ζωής μερικώς κλειστού κύκλου του ISS. Προσαρμογή από (Skoog, 2013)

Η απομάκρυνση του CO_2 γίνεται, όπως στο Skylab, κυρίως με τη χρήση της τεχνολογίας μοριακού κόσκινου με φυσίγγια ζεόλιθου, τα οποία επιτυγχάνουν ταυτόχρονα τη δέσμευση τόσο του CO_2 όσο και της υγρασίας. Υπάρχει, βέβαια, και υποστηρικτικό σύστημα που, σε περίπτωση ανάγκης, απομακρύνει το CO_2 με την παραδοσιακή μέθοδο των φυσιγγίων $LiOH$. Η παροχή του απαιτούμενου οξυγόνου γίνεται, όπως στον Mir, μέσω ηλεκτρόλυσης υδρατμών που προέρχονται από τον κύκλο του νερού. Το απαιτούμενο άζωτο για το συμπλήρωμα του μείγματος αέρα της ατμόσφαιρας

παρέχεται ως προμήθεια από τη Γη. Ο έλεγχος της ποιότητας του αέρα γίνεται με τη χρήση φυσιγγίων ενεργού άνθρακα. Αντίθετα με τον Mir, ο ISS χρησιμοποιεί ένα και μοναδικό κύκλωμα για την ανάκτηση πόσιμου νερού από την υγρασία της ατμόσφαιρας, το νερό υγιεινής και τα υγρά μεταβολικά απόβλητα των αστροναυτών. Τα ούρα των αστροναυτών υφίστανται μια διαδικασία απόσταξης και έπειτα αναμειγνύεται με το νερό υγιεινής και το συμπύκνωμα των υδρατμών. Στη συνέχεια, το ενιαίο ρεύμα λυμάτων περνάει από ένα σύστημα πολλαπλών επιπέδων φιλτραρίσματος, το οποίο περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, και ρητίνες ιοντοεναλλαγής και ενεργό άνθρακα, όπως και το σύστημα του Mir. Ο έλεγχος της ποιότητας του παραγόμενου πόσιμου νερού γίνεται με την προσθήκη ιωδίου ή ιόντων αργύρου σε αυτό, σε συνδυασμό με τη θερμική αποστείρωσή του. Όπως και στον Mir, η εναπομένουσα άλμη από τη διαδικασία ανάκτησης του νερού συλλέγεται σε δεξαμενές και επιστρέφεται στη Γη, μαζί με τα στερεά μεταβολικά απόβλητα των αστροναυτών και τα στερεά υπολείμματα των τροφών, με τη χρήση του μη επανδρωμένου διαστημικού σκάφους Progress. Η καινοτομία της εξειδικευμένης διαστημικής τουαλέτας που εισήγαγε το Διαστημικό Λεωφορείο έχει διατηρηθεί, βεβαίως, και στον ISS. Τέλος, το διαστημικό σκάφος Progress ανεφοδιάζει τον ISS με μια ποικιλία κονσερβοποιημένων, κατεψυγμένων, αλλά και φρέσκων τροφών, τα οποία αποθηκεύονται σε ψυγεία και καταψύκτες και προετοιμάζονται από τους αστροναύτες σε φούρνο που υπάρχει στον διαστημικό σταθμό. Η μεταφορά των πληρωμάτων από και προς τον ISS γίνεται σήμερα αποκλειστικά με τα ρωσικά διαστημικά σκάφη Soyuz, ενώ η απρόσκοπτη λειτουργία του διαστημικού σταθμού έχει προγραμματιστεί ως το 2020, με ανοιχτή και την προοπτική μελλοντικής του αξιοποίησης. Οι διάφορες διαστημικές υπηρεσίες που συνεργάζονται για τη λειτουργία και τη συντήρησή του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού είναι η NASA (ΗΠΑ), η Roscosmos (Ρωσία), η ESA (Ευρώπη), η JAXA (Ιαπωνία) και η CSA (Καναδάς), ενώ τον συντονιστικό και διοικητικό ρόλο στην ανάπτυξη και την υλοποίηση του όλου εγχειρήματος κατέχει η NASA (Clément, 2011) (Grahn & Norberg, 2013) (Skoog, 2013).

Shenzhou και Tiangong (2003-Σήμερα): Το 2003 η Κίνα έγινε το τρίτο έθνος που κατάφερε να στείλει έναν αστροναύτη στο διάστημα, χρησιμοποιώντας το διαστημικό σκάφος Shenzhou 5. Ο Κινέζος αστροναύτης Yang Liwei επέστρεψε στη Γη μετά από δεκατέσσερις περίγειες περιφορές. Ο σχεδιασμός των διαστημικών σκαφών της σειράς Shenzhou είναι βασισμένος σε εκείνον των ρωσικών διαστημικών σκαφών Soyuz, χάρη σε μια διακρατική συμφωνία μεταξύ Ρωσίας και Κίνας, και παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς έως και τριών αστροναυτών με πλήρη εξάρτυση διαστημικών στολών. Το σύστημα υποστήριξης ζωής του είναι, όπως και του Soyuz, ανοιχτού κύκλου. Το 2011 η Κίνα έβαλε σε τροχιά το πρώτο από τη σειρά διαστημικών επιστημονικών εργαστηρίων Tiangong, το Tiangong 1, ενώ το επόμενο έτος επετεύχθη η πρώτη επανδρωμένη σύνδεση του Tiangong 1 με το διαστημικό σκάφος Shenzhou 9. Ο σκοπός του κινεζικού διαστημικού προγράμματος που

αποτελείται από τα σκάφη **Shenzhou** και τους μικρούς πειραματικούς διαστημικούς σταθμούς **Tiangong** είναι η ανάπτυξη ενός εξελιγμένου διαστημικού σταθμού, σαν τον σοβιετικό **Mir**, για μόνιμη κατοίκηση έως το 2025. Για τον λόγο αυτό, πολλά από τα επιστημονικά πειράματα στον **Tiangong 1** επικεντρώνονται στην πιλοτική υλοποίηση, δοκιμή και περαιτέρω ανάπτυξη ενός συστήματος υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου (Grahm & Norberg, 2013) (Macdonald, et al., 2014) (Aliberti, 2015).

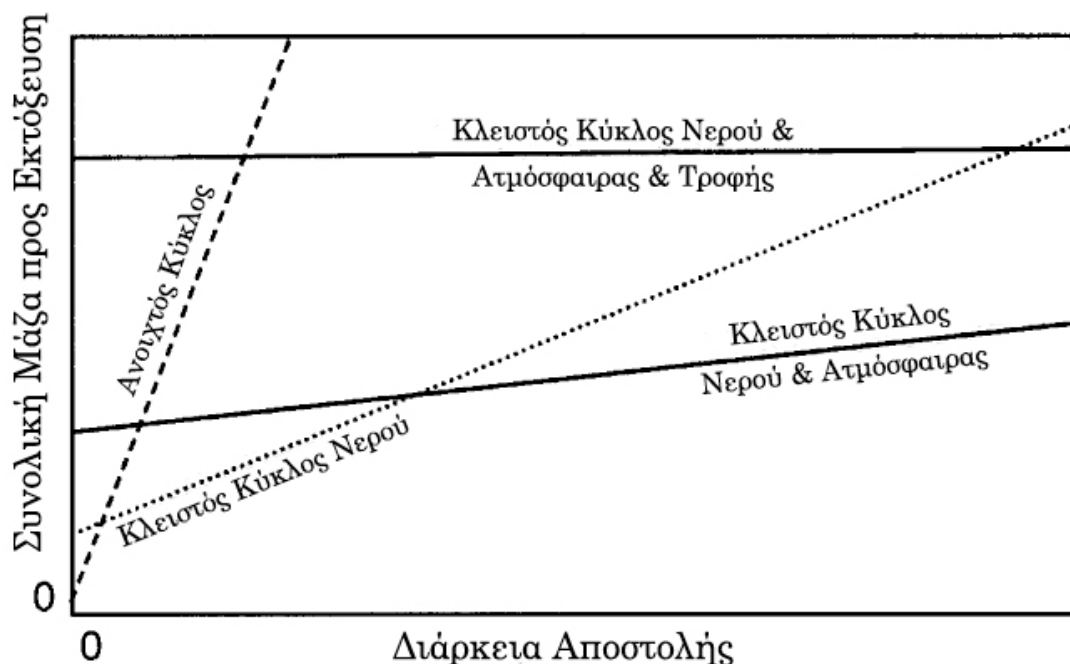
Από τα προλεχθέντα, φαίνεται πως η μετάβαση από τα συστήματα υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου σε εκείνα του μερικώς κλειστού κύκλου ακολούθησε τόσο την πορεία της τεχνολογικής ωριμότητας των διαστημικών προγραμμάτων όσο και την ανάγκη εγκαθίδρυσης μιας πιο μακροχρόνιας παρουσίας του ανθρώπου στο εχθρικό διαστημικό περιβάλλον. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει πως τα συστήματα αυτά ενέχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία καθορίζουν και την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα της χρήσης τους στο πλαίσιο της εκάστοτε διαστημικής αποστολής. Αυτά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δυο κυρίαρχων αρχιτεκτονικών προσεγγίσεων των συστημάτων υποστήριξης ζωής θα εξεταστούν ευθύς αμέσως, στην **Ενότητα 1.4**.

1.4 Συγκριτική επισκόπηση συστημάτων υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου και κλειστού κύκλου

Στην προηγούμενη ενότητα παρακολουθήσαμε την εξέλιξη των διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής και το σταδιακό κλείσιμο αρκετών από τους κύκλους τους, η οποία συντελέστηκε παράλληλα με την ωρίμανση των διαστημικών προγραμμάτων και την εμφάνιση της ανάγκης μακροχρόνιας κατοίκησης των διάφορων διαστημικών σταθμών. Βεβαίως, όσο ο αριθμός των φιλοξενούμενων αστροναυτών και οι ημέρες παραμονής τους στο διαστημικό περιβάλλον αυξάνονται τόσο η ανακύκλωση των βασικών μεταβολικών πόρων του οξυγόνου, του νερού και της τροφής θα αποκτά οικονομικό πλεονέκτημα έναντι της κατασπατάλησής τους. Από την άλλη, τα συστήματα υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου δεν είναι απαραίτητα σε μειονεκτική θέση, καθώς μπορεί υπό προϋποθέσεις να αποδειχθούν πιο ανταγωνιστικά από τα κλειστού κύκλου (Yamashita & Wheeler, 2014).

Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου τείνουν να είναι αρκετά απλά και πολύ αποδοτικά, ενώ έχουν ήδη δοκιμαστεί εκτενώς για αρκετές δεκαετίες εν πτήσει. Μάλιστα, για μικρά πληρώματα και σύντομης διάρκειας αποστολές, αυτά τα συστήματα φαίνεται ότι είναι καταλληλότερα από τα συστήματα κλειστού κύκλου, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.6**· αυτό οφείλεται στην αρκετά μεγαλύτερη αρχική μάζα

εκτόξευσης που απαιτεί ο εξοπλισμός ανακύκλωσης που επιτυγχάνει το κλείσιμο των κύκλων στα συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου. Από την άλλη, το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι οι απαιτήσεις σε τακτικό ανεφοδιασμό με προμήθειες των βασικών πόρων του οξυγόνου, του νερού και της τροφής, η μάζα των οποίων αυξάνεται γραμμικά με έντονη κλίση ως συνάρτηση του μεγέθους του πληρώματος και της διάρκειας της αποστολής (Eckart, 1996) (Clément, 2011) (Skoog, 2013).



Σχήμα 1. 6: Σχετική επίδοση συστημάτων υποστήριξης ζωής ανοιχτού, μερικώς και πλήρως κλειστού κύκλου, σε σχέση με τη διάρκεια μιας διαστημικής αποστολής αναφοράς. Προσαρμογή από (Barta & Henninger, 1994)

Το μεγάλο πλεονέκτημα των συστημάτων μερικώς και πλήρως κλειστού κύκλου είναι η άπαξ μεταφορά των αρχικών προμηθειών και του εξοπλισμού ανακύκλωσης των πόρων, με λίγες ή ελάχιστες απαιτήσεις ανεφοδιασμού, καθώς απαιτούνται μόνο μικρές ποσότητες μάζας για την αναπλήρωση των απωλειών που παρουσιάζονται στην ανακύκλωση των πόρων και ορισμένα ανταλλακτικά εξαρτήματα για τη συντήρηση του σχετικού εξοπλισμού. Το μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η χαμηλότερη τεχνολογική ωριμότητα και οι αυξημένες απαιτήσεις σε κατανάλωση θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (Eckart, 1996) (Clément, 2011) (Skoog, 2013).

Στο **Σχήμα 1.6** φαίνεται ποιοτικά η σχετική επίδοση των συστημάτων υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου, μερικώς κλειστού και πλήρως κλειστού κύκλου συναρτήσει της διάρκειας μιας διαστημικής αποστολής αναφοράς. Η

επίδοση αυτή αντανακλάται στην απαιτούμενη μάζα προς εκτόξευση για το εκάστοτε σύστημα, η οποία είναι και ο καθοριστικός παράγοντας του κόστους κάθε διαστημικής αποστολής. Τα σημεία τομής των τεσσάρων γραφικών παραστάσεων που αντιπροσωπεύουν τον ανοιχτό κύκλο, τον κλειστό κύκλο νερού, τον κλειστό κύκλο νερού και ατμόσφαιρας και τον κλειστό κύκλο νερού, ατμόσφαιρας και τροφής αποτελούν τα σημεία εξισορρόπησης του κόστους μάζας του ζεύγους των τεχνολογιών που αντικατοπτρίζονται στις τεμνόμενες καμπύλες. Τα σημεία εξισορρόπησης υποδεικνύουν την ελάχιστη διάρκεια της διαστημικής αποστολής που απαιτείται, έτσι ώστε να είναι ο ένας τύπος συστήματος υποστήριξης ζωής καταλληλότερος από τον άλλον, από τη σκοπιά του κόστους της μάζας προς εκτόξευση. Παρατηρούμε ότι τα συστήματα ανοιχτού κύκλου είναι καταλληλότερα μόνο για βραχυχρόνιες αποστολές, ενώ τα συστήματα πλήρως κλειστού κύκλου είναι καταλληλότερα μόνο για εξαιρετικά μακροχρόνιες αποστολές, όπως, για παράδειγμα, η εγκαθίδρυση μιας μόνιμης ερευνητικής βάσης στην επιφάνεια του Άρη και της Σελήνης. Για διαστημικές αποστολές με ενδιάμεση διάρκεια, όπως η κατοίκηση του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού ή οι επανδρωμένες πτήσεις προς τον Άρη και τη Σελήνη, φαίνεται ότι είναι καταλληλότερα τα συστήματα κλειστού κύκλου νερού και ατμόσφαιρας και μόνο μερικώς κλειστού κύκλου τροφής (Barta & Henninger, 1994) (Skoog, 2013).

Όπως είδαμε και στην **Ενότητα 1.2**, το κλείσιμο του κύκλου του νερού εξοικονομεί περίπου το 70% της συνολικής μάζας με την οποία χρειάζεται να ανατροφοδοτηθεί το πλήρωμα ενός διαστημικού σκάφους. Ο συνδυασμός του κλεισίματος του κύκλου του νερού και του αέρα εξοικονομεί περίπου το 90% αυτής της μάζας. Η εξοικονόμηση του υπόλοιπου 10% -ή τουλάχιστον ενός μέρους του- απαιτεί την ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών που εμπεριέχονται στα απόβλητα των αστροναυτών και τη μετατροπή τους σε τροφή. Ενώ οι δύο προηγούμενοι κύκλοι είναι εφικτό να κλείσουν με φυσικοχημικές τεχνικές, αυτός ο τελευταίος κύκλος της παραγωγής τροφής μπορεί να κλείσει μόνο με την ενσωμάτωση και την αξιοποίηση βιολογικών μεθόδων. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν εκτενώς οι διαφορετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις, φυσικοχημικές και βιολογικές, που μπορούν να συνεισφέρουν στην υλοποίηση διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής μερικώς ή πλήρως κλειστού κύκλου.

1.5 Βιβλιογραφία

Aliberti, M., 2015. China's Way to the Moon. In: *When China Goes to the Moon*. s.l.:Springer International Publishing Switzerland, pp. 79-128.

Barta, D. J. & Henninger, D. L., 1994. Regenerative Life Support Systems - Why do we need them?. *Adv. Space Res.*, Volume 14, pp. 403-410.

Clément, G., 2011. Introduction to Space Life Sciences. In: *Fundamentals of Space Medicine*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+Business Media, pp. 1-44.

Clément, G., 2011. Life Support Systems. In: *Fundamentals of Space Medicine*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+Business Media, pp. 305-340.

Clément, G., 2011. Space Biology. In: *Fundamentals of Space Medicine*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+Business Media, pp. 45-94.

Clément, G., 2011. The Cardio-Vascular System in Space. In: *Fundamentals of Space Medicine*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+Business Media, pp. 143-180.

Clément, G., 2011. The Musculo-Skeletal System in Space. In: *Fundamentals of Space Medicine*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+Business Media, pp. 181-216.

Clément, G., 2011. The Neuro-Sensory System in Space. In: *Fundamentals of Space Medicine*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+Business Media, pp. 95-142.

Eckart, P., 1996. Fundamentals of Life Support Systems. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 79-174.

Eckart, P., 1996. The extraterrestrial environment. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 39-78.

Grahn, S. & Norberg, C., 2013. History of human spaceflight. In: C. Norberg, ed. *Human Spaceflight and Exploration*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 11-64.

Macdonald, M., Norris, P. & Spencer, D. B., 2014. Introduction. In: M. Macdonald & V. Badescu, eds. *The International Handbook of Space Technology*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-24.

Norberg, C., 2013. The space environment. In: C. Norberg, ed. *Human Spaceflight and Exploration*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 65-120.

Skoog, A. I., 2013. Life support systems. In: C. Norberg, ed. *Human Spaceflight and Exploration*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 161-207.

Yamashita, M. & Wheeler, R. M., 2014. Habitation in Space. In: M. Macdonald & V. Badescu, eds. *The International Handbook of Space Technology*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 493-514.

Κεφάλαιο 2: Συστήματα Υποστήριξης Ζωής Κλειστού Κύκλου

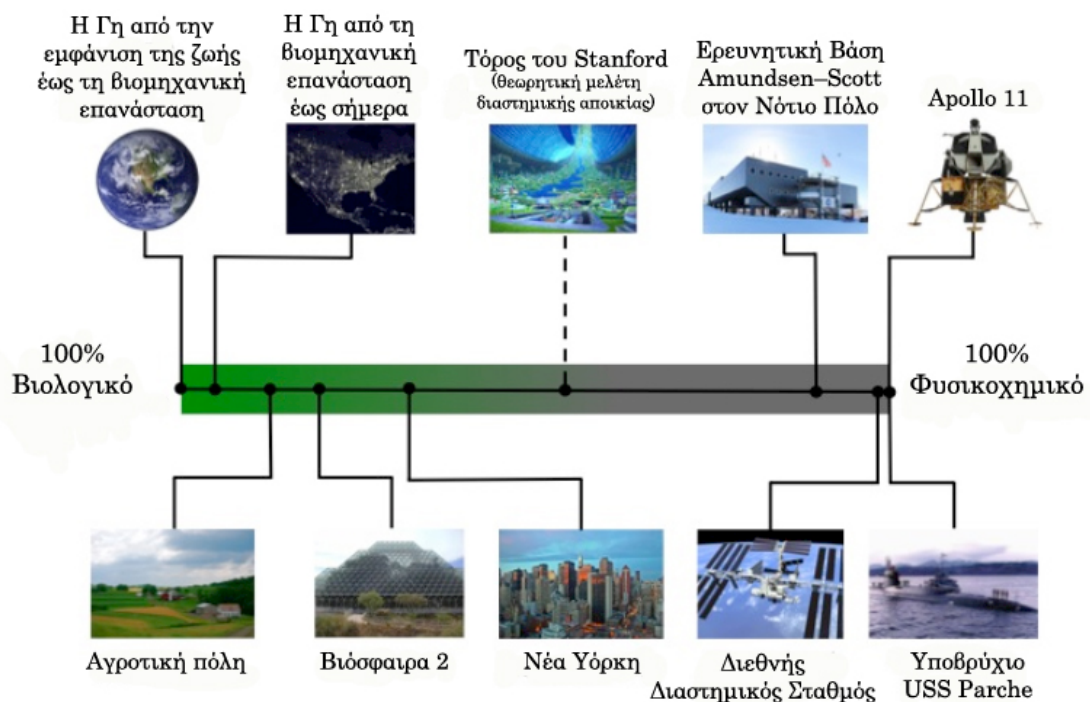
2.1 Μέθοδοι και τεχνικές για το κλείσιμο του κύκλου

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πλήρωμα ενός διαστημικού σκάφους χρειάζεται, συν τοις άλλοις, μια συνεχή εισροή οξυγόνου, νερού και τροφής για να μπορέσει να επιβιώσει. Παράλληλα, οι εκροές των αέριων, υγρών και στερεών αποβλήτων που παράγονται από το πλήρωμα θα πρέπει να υφίστανται κατάλληλη διαχείριση και επεξεργασία για να μη συσσωρεύονται στον περιορισμένο χώρο της καμπίνας. Είδαμε, επίσης, ότι ανάλογα με τη χρονική διάρκεια της εκάστοτε επανδρωμένης διαστημικής αποστολής επιλέγεται και το κατάλληλο σύστημα υποστήριξης ζωής. Στην περίπτωση αποστολών βραχείας διάρκειας και σε κοντινή απόσταση από τη Γη χρησιμοποιούνται συστήματα υποστήριξης ζωής ανοιχτού κύκλου, όπου οι προμήθειες αποθηκεύονται στο διαστημικό σκάφος εκ των προτέρων και τα απόβλητα είτε αποθηκεύονται και επιστρέφονται στη Γη είτε απορρίπτονται στο διάστημα. Στην περίπτωση αποστολών μακράς διάρκειας, από την άλλη, όπως για παράδειγμα στον Διαστημικό Σταθμό Mir ή τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό σε χαμηλή περιγεια τροχιά (LEO), προτιμήθηκε η εφαρμογή συστημάτων υποστήριξης ζωής μερικώς κλειστού κύκλου, με τη χρήση τεχνολογιών ανακύκλωσης του νερού. Σε μελλοντικές επανδρωμένες διαστημικές αποστολές ακόμη μεγαλύτερης διάρκειας και πέρα από την τροχιά LEO, όμως, όπως για παράδειγμα σε διαπλανητικές αποστολές ή σε ερευνητικές βάσεις σε άλλα πλανητικά σώματα του ηλιακού συστήματος, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή πιο εξελιγμένων συστημάτων υποστήριξης ζωής με σχεδόν πλήρη ανακύκλωση των αποβλήτων και βέλτιστη ανάκτηση των απαραίτητων πόρων (Yamashita & Wheeler, 2014).

Οι μέθοδοι και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για το κλείσιμο των κύκλων του νερού, του αέρα και της τροφής μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας των στερεών, υγρών και αέριων αποβλήτων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στις φυσικοχημικές και στις βιολογικές. Οι φυσικοχημικές μέθοδοι αξιοποιούν φυσικές ή/και χημικές διεργασίες, ενώ οι βιολογικές μέθοδοι χρησιμοποιούν βιολογικούς παράγοντες ή διεργασίες προκειμένου να πετύχουν την ανάκτηση των χρήσιμων πόρων. Γενικά, οι βιολογικές μέθοδοι δεν είναι τόσο αναπτυγμένες και δοκιμασμένες εν πτήσει όσο οι φυσικοχημικές, όμως είναι οι μόνες που μπορούν να κλείσουν τον κύκλο της τροφής, μέσω ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από τα απόβλητα. Στην

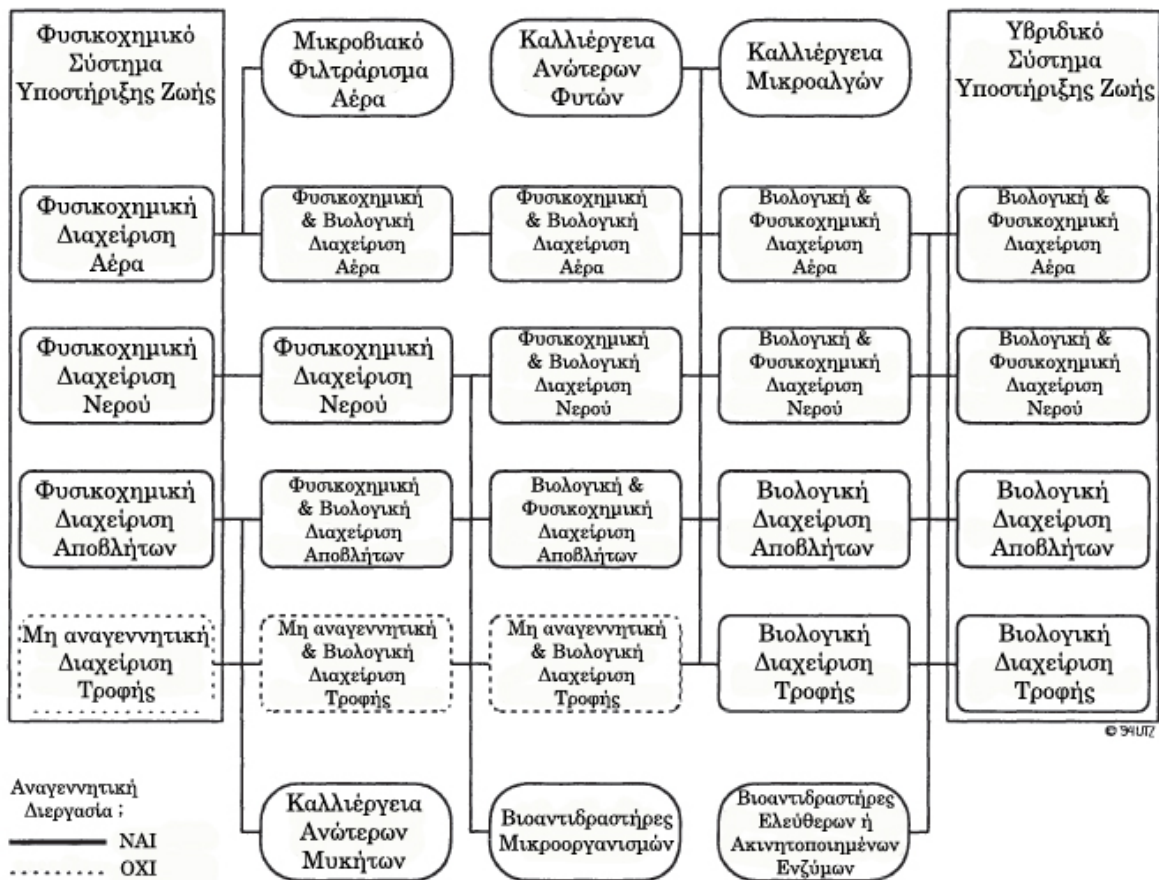
πραγματικότητα, βέβαια, μέχρις ότου να γίνουν γνωστές στην επιστήμη όλες οι παράμετροι των επιδράσεων του διαστημικού περιβάλλοντος στους βιολογικούς οργανισμούς, η βέλτιστη λύση για την υλοποίηση ενός εξελιγμένου συστήματος υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου θα είναι η υβριδική αξιοποίηση τόσο φυσικοχημικών όσο και βιολογικών μεθόδων (Clément, 2011) (Eckart, 1996) (Barta & Henninger, 1994) (Shaw & de Weck, 2014).

Στο **Σχήμα 2.1** απεικονίζεται η σχετική θέση διαφόρων ανθρώπινων ενδιατημάτων πάνω στο συνεχές των κύριων μεθόδων υποστήριξης ζωής που χρησιμοποιούν. Το συνεχές αυτό εκτείνεται από τις πλήρως φυσικοχημικές μεθόδους έως τις πλήρως βιολογικές και ενδιάμεσα περιλαμβάνει υβριδικές μεθόδους με διάφορα ποσοστά συνεισφοράς βιολογικών και φυσικοχημικών τεχνικών. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους της ιστορίας τους οι άνθρωποι βασίζονταν αποκλειστικά σε βιολογικές διεργασίες για την υποστήριξη της ζωής τους στη Γη. Μόλις σχετικά πρόσφατα, μετά την περίοδο της Βιομηχανικής Επανάστασης, το βιολογικό σύστημα υποστήριξης ζωής της Γης τροποποιήθηκε σημαντικά από την εισαγωγή νέων τεχνητών και ανθρωπογενών φυσικοχημικών διεργασιών. Στο άλλο άκρο του φάσματος βρίσκονται οι πρώτες απόπειρες τεχνητών ανθρώπινων ενδιατημάτων βραχείας διάρκειας: τα πρώτα διαστημικά σκάφη και τα υποβρύχια. Περίπου στο μέσο της κατάταξης βρίσκεται ο λεγόμενος Τόρος του Stanford, μια θεωρητική μελέτη μιας μελλοντικής διαστημικής αποικίας, που αποτελεί υβριδισμό μεγάλου πλήθους περίπλοκων βιολογικών και φυσικοχημικών τεχνολογιών (Shaw & de Weck, 2014).



Σχήμα 2. 1: Κατάταξη ανθρώπινων ενδιατημάτων στο φυσικοχημικό και βιολογικό συνεχές, σύμφωνα με τα συστήματα υποστήριξης ζωής που χρησιμοποιούν. Προσαρμογή από (Shaw & de Weck, 2014)

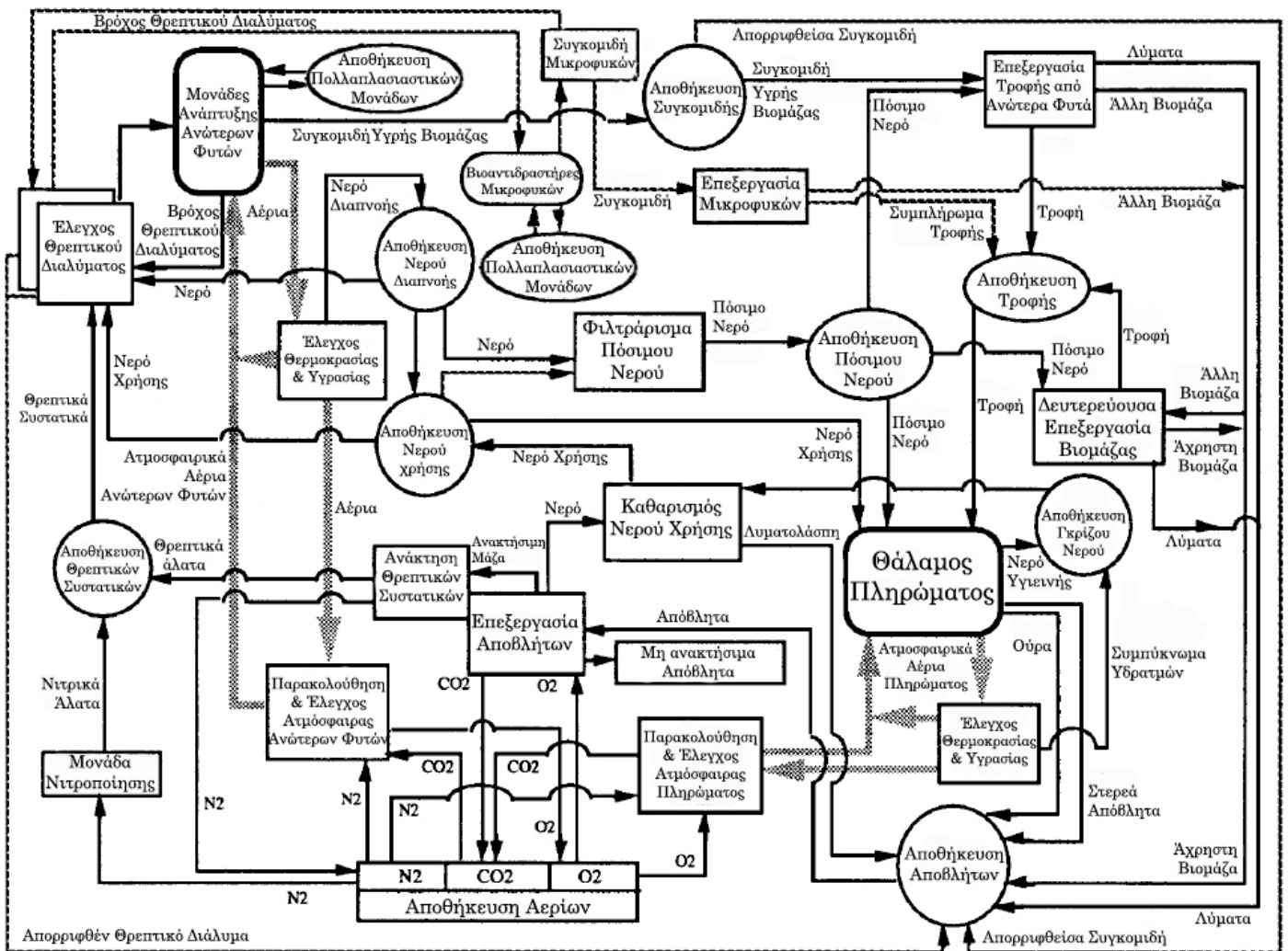
Καθώς, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.1**, τα υβριδικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου είναι το επόμενο βήμα της τεχνολογικής εξέλιξης των τωρινών πλήρως φυσικοχημικών συστημάτων, γίνεται κατανοητό πως απαιτείται μια στρατηγική σταδιακής μετάβασης που θα υλοποιείται παράλληλα με την ωρίμανση των κατάλληλων βιολογικών τεχνολογιών. Η λογική μιας τέτοιας στρατηγικής που υποδεικνύει την ενσωμάτωση ώριμων βιολογικών υποσυστημάτων στο όλο σύστημα, τα οποία θα λειτουργούν συνεργατικά με τα ήδη υπάρχοντα φυσικοχημικά υποσυστήματα, παρουσιάζεται ποιοτικά στο **Σχήμα 2.2** (Eckart, 1996).



Σχήμα 2. 2: Πιθανά στάδια μετάβασης από ένα φυσικοχημικό σε ένα υβριδικό σύστημα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου με την προσθήκη κατάλληλων βιολογικών υποσυστημάτων. Προσαρμογή από (Eckart, 1996)

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες υποψήφιες τεχνολογίες που δύνανται να πραγματοποιήσουν τις απαραίτητες διεργασίες υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου που αναφέρονται στο **Σχήμα 2.2** με τη μορφή είτε φυσικοχημικών είτε βιολογικών υποσυστημάτων. Οι τεχνολογίες αυτές αναπτύσσονται παράλληλα από πλήθος Διαστημικών Υπηρεσιών και ερευνητικών οργανισμών και το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητάς τους (Technology Readiness Level, TRL) ποικίλει από πλήρως λειτουργικά και

δοκιμασμένα υποσυστήματα έως υποσυστήματα που βρίσκονται ακόμη στα αρχικά στάδια της σύλληψης και του σχεδιασμού τους. Για τον λόγο αυτό, στην **Ενότητα 2.2** θα συζητηθούν όλες οι διαθέσιμες φυσικοχημικές τεχνολογίες για το κλείσιμο των κύκλων, ενώ στην **Ενότητα 2.3** θα αναλυθούν οι αντίστοιχες βιολογικές, τόσο οι ώριμες και λειτουργικές όσο και οι θεωρητικές και πειραματικές. Τέλος, για να γίνει αντιληπτός ο βαθμός της πολυπλοκότητας των αλληλεπιδράσεων και αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των φυσικοχημικών και των βιολογικών υποσυστημάτων ενός υβριδικού συστήματος υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται το πλήρες σχεδιάγραμμα αναφοράς ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος, όπως αυτό μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ήδη από το 1978 στο πλαίσιο του προγράμματος των Κλειστών Οικολογικών Συστημάτων Υποστήριξης Ζωής (Closed Ecological Life Support Systems, CELSS) της NASA (Barta & Henninger, 1994).



Σχήμα 2. 3: Πλήρες σχεδιάγραμμα αναφοράς ενός υβριδικού συστήματος υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου του προγράμματος CELSS της NASA. Προσαρμογή από (Barta & Henninger, 1994)

2.2 Θεματική παρουσίαση φυσικοχημικών τεχνολογιών υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου

Σε ένα σύστημα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου που υλοποιείται μόνο με φυσικοχημικές τεχνολογίες ο μόνος βιολογικός παράγοντας είναι ο άνθρωπος. Για την τεχνική διεκπεραίωση των φυσικοχημικών διεργασιών ενός τέτοιου συστήματος συχνά χρησιμοποιούνται τυποποιημένα μηχανολογικά εξαρτήματα -όπως ανεμιστήρες και μηχανικά φίλτρα-, φυσικές μέθοδοι διαχωρισμού -όπως μοριακά κόσκινα, αντίστροφη όσμωση και ηλεκτρόλυση-, αλλά και χημικές μέθοδοι διαχωρισμού. Μέχρι σήμερα, μόνο με τη χρήση φυσικοχημικών τεχνολογιών έχει επιτευχθεί εν πτήση η ανακύκλωση και ανάκτηση νερού και οξυγόνου από τα μεταβολικά απόβλητα των αστροναυτών. Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι διάφορες εναλλακτικές φυσικοχημικές τεχνολογίες υποστήριξης ζωής, μαζί με το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητάς τους, οι οποίες εντάσσονται στους ακόλουθους τρεις θεματικούς άξονες: διαχείριση ατμόσφαιρας, διαχείριση νερού και διαχείριση -στερεών και ημίρρευστων- αποβλήτων (Clément, 2011) (Yamashita & Wheeler, 2014).

Διαχείριση ατμόσφαιρας: Ο ρόλος του υποσυστήματος διαχείρισης ατμόσφαιρας είναι ο διαρκής έλεγχος και η εξυγίανση της ατμόσφαιρας της καμπίνας των αστροναυτών. Αναφορικά με το κλείσιμο του κύκλου του οξυγόνου, που είναι και η κύρια λειτουργία του εν λόγω υποσυστήματος, τα τρία βήματα που πρέπει να επιτελούνται αδιαλείπτως είναι: η παγίδευση του CO₂, η αναγωγή του CO₂ και, τέλος, η παραγωγή και παροχή O₂. Παράλληλα, το υποσύστημα διαχείρισης ατμόσφαιρας είναι υπεύθυνο και για την παρακολούθηση και την απομάκρυνση επικίνδυνων ιχνοποσοτήτων ρύπων, αιωρούμενων σωματιδίων και παθογόνων μικροοργανισμών από την ατμόσφαιρα, όπως επίσης και για τον έλεγχο των επιπέδων της πίεσης, της θερμοκρασίας και της υγρασίας της (Eckart, 1996) (Wieland, 1994).

Για την παγίδευση του CO₂, προκειμένου να αποφεύγεται η αύξηση της συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα της καμπίνας σε τοξικά επίπεδα, οι κύριες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί είναι: τα μοριακά κόσκινα (molecular sieves), οι στερεές αμίνες εκρόφησης νερού (solid amine water desorption), οι αποπολωμένοι ηλεκτροχημικοί συμπυκνωτές (electrochemical depolarized concentrators) και οι πολωμένοι συμπυκνωτές αέρα (air polarized concentrators) (Eckart, 1996).

Τα μοριακά κόσκινα χρησιμοποιούν συνθετικούς ζεόλιθους, δηλαδή αργιλοπυριτικά άλατα, για την παγίδευση του CO₂. Υπάρχουν δύο υλοποιήσεις αυτής της φυσικοχημικής τεχνικής: τα μοριακά κόσκινα δύο στρωμάτων (two-bed molecular sieves) και τα μοριακά κόσκινα τεσσάρων στρωμάτων (four-bed molecular sieves). Στην πρώτη περίπτωση υλοποίησης,

δύο στρώματα συνθετικού ζεόλιθου χρησιμοποιούνται εναλλάξ στον ίδιο κύκλο λειτουργίας για την παράλληλη εισρόφηση CO₂ από την ατμόσφαιρα της καμπίνας και την εκρόφησή του προς το στάδιο της αναγωγής. Καθώς οι ζεόλιθοι εισροφούν πρωτίστως την υγρασία της ατμόσφαιρας, είναι απαραίτητη η πρότερη ξήρανση του αέρα που εισέρχεται στο φυσίγγιο του ζεόλιθου με διοξείδιο του πυριτίου. Στη δεύτερη περίπτωση υλοποίησης, από την άλλη, τέσσερα στρώματα συνθετικού ζεόλιθου χρησιμοποιούνται εναλλάξ στον ίδιο κύκλο σε δύο ζεύγη ως εξής: το πρώτο ζεύγος στρωμάτων αναλαμβάνει πρώτα την εισρόφηση του H₂O από τον εισερχόμενο αέρα και έπειτα του CO₂, ενώ το δεύτερο ζεύγος αναλαμβάνει πρώτα την εκρόφηση του CO₂ προς το στάδιο της αναγωγής και έπειτα την εκρόφηση του H₂O στον εξερχόμενο αέρα που τελικά επιστρέφεται στην ατμόσφαιρα της καμπίνας. Μια άλλη λύση αυτού του προβλήματος διαχείρισης των υδρατμών είναι η αντικατάσταση των στρωμάτων ζεόλιθου με ένα ζεύγος μοριακών κόσκινων άνθρακα. Στην υλοποίηση αυτή, εξαιτίας της αδυναμίας των στρωμάτων του άνθρακα να εισροφήσουν τους υδρατμούς, στο πρώτο στρώμα άνθρακα εισροφάται από τον εισερχόμενο αέρα μόνο το CO₂, ενώ παράλληλα εκροφάται CO₂ από το δεύτερο στρώμα άνθρακα προς το στάδιο της αναγωγής. Η διάταξη αυτή είναι, δηλαδή, δύο στρωμάτων και δεν απαιτεί τη χρήση τεχνικών ξήρανσης με διοξείδιο του πυριτίου ή δεύτερο ζεύγος στρωμάτων ζεόλιθου, όπως οι προαναφερθείσες (Eckart, 1996).

Οι στερεές αμίνες εκρόφησης νερού (*solid amine water desorption*) λειτουργούν παρομοίως με τα μοριακά κόσκινα δύο στρωμάτων. Στην υλοποίηση αυτής της τεχνικής, δύο στρώματα στερεής αμίνης, που εμπεριέχονται σε φυσίγγια, εναλλάσσονται στην εισρόφηση και εκρόφηση CO₂ από τον αέρα της καμπίνας εντός του ίδιου κύκλου λειτουργίας. Καθώς η ξηρή αμίνη δεν μπορεί να αντιδράσει άμεσα με το CO₂ για να το δεσμεύσει, για την εισρόφηση του ακολουθείται μια διαδικασία δύο βημάτων. Πρώτα, μια ενεργή ρητίνη ιοντοεναλλαγής, δηλαδή ένα συμπολυμερές πολυστυρένιου-διβινυλοβενζόλιου αμινωμένο με διαιθυλενοτριαμίνη, το οποίο εμπεριέχεται στα δύο φυσίγγια με τη μορφή σφαιριδίων διαμέτρου δεκάτων του χιλιοστού, συνδέεται με νερό και σχηματίζει ένυδρη αμίνη. Για βέλτιστη εισρόφηση του CO₂, προτείνεται η περιεκτικότητα σε νερό αυτού του σχηματιζόμενου διαλύματος να είναι μεταξύ 20-35% w/w. Στη συνέχεια, η ένυδρη αμίνη αντιδρά με το CO₂ για να σχηματίσει τελικά ένα διττανθρακικό άλας. Για να επιτευχθεί η εκρόφηση του δεσμευμένου CO₂ από αυτό το διττανθρακικό άλας, χρησιμοποιείται θερμός ατμός. Ο θερμός ατμός εφαρμόζεται στο άλας και σπάει τον όξινο ανθρακικό δεσμό του, απελευθερώνοντας νερό και CO₂ και επαναφέροντας την ενεργή ρητίνη στην πρότερη κατάστασή της για να χρησιμοποιηθεί για εισρόφηση στον επόμενο κύκλο λειτουργίας. Το CO₂ που εκροφάται συλλέγεται σε έναν συσσωρευτή και οδηγείται στη συνέχεια στο στάδιο της αναγωγής (Eckart, 1996).

Οι αποπολωμένοι ηλεκτροχημικοί συμπυκνωτές (electrochemical depolarized concentrators) είναι ηλεκτροχημικές κυψέλες εντός των οποίων το H_2 και το O_2 αντιδρούν με το CO_2 , δημιουργώντας δύο ροές προϊόντων. Μια τυπική τέτοια κυψέλη χρησιμοποιεί μια διάταξη δύο ηλεκτροδίων, μιας ανόδου και μιας καθόδου, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται ένα πορώδες μητρώο που περιέχει τον υδατικό ηλεκτρολύτη Cs_2CO_3 . Από την πλευρά της καθόδου εισέρχεται στην κυψέλη ροή αέρα από την ατμόσφαιρα της καμπίνας, και, παράλληλα, από την πλευρά της ανόδου εισέρχεται στην κυψέλη αέριο H_2 . Οι υδρατμοί του αέρα της καμπίνας αντιδρούν ηλεκτροχημικά στην κάθοδο με το οξυγόνο που περιέχεται σε αυτόν και αποδίδουν ιόντα OH^- . Ένα μέρος αυτών των ανιόντων αντιδρούν στην κάθοδο με το CO_2 , που επίσης περιέχεται στον εισερχόμενο αέρα, και αποδίδουν ιόντα CO_3^{2-} και H_2O , ενώ τα υπόλοιπα μετακινούνται, λόγω του αρνητικού φορτίου τους, προς την άνοδο της κυψέλης δια μέσου του πορώδους μητρώου. Έπειτα, τα παραγόμενα ιόντα CO_3^{2-} , εξαιτίας του αρνητικού φορτίου τους, μετακινούνται επίσης από την κάθοδο προς την άνοδο. Ο αέρας που εισέρχεται από την πλευρά της καθόδου, εξέρχεται επίσης από την πλευρά της καθόδου μετά τη δέσμευση του CO_2 του σε ιόντα CO_3^{2-} . Στην πλευρά της ανόδου, τώρα, τα ιόντα OH^- αντιδρούν με το εισερχόμενο αέριο H_2 και αποδίδουν H_2O . Στη συνέχεια, το παραγόμενο H_2O αντιδρά με τα ιόντα CO_3^{2-} και απελευθερώνει αέριο CO_2 και ιόντα OH^- . Με τον τρόπο αυτό, το CO_2 απομονώνεται τελικά από τον εισερχόμενο αέρα μέσα στην κυψέλη και εξέρχεται από την άνοδο προς το επόμενο στάδιο, αυτό της αναγωγής (Eckart, 1996).

Οι πολωμένοι συμπυκνωτές αέρα (air polarized concentrators) είναι ηλεκτροχημικές κυψέλες που λειτουργούν παρομοίως με τους αποπολωμένους ηλεκτροχημικούς συμπυκνωτές, μόνο που δεν χρειάζονται εισροή αερίου H_2 στην πλευρά της ανόδου. Στην περίπτωση αυτή, η παγίδευση του CO_2 γίνεται σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα χρησιμοποιεί μια διάταξη παρόμοια με έναν αποπολωμένο ηλεκτροχημικό συμπυκνωτή χωρίς την εισροή H_2 . Στην πλευρά της καθόδου αυτής της διάταξης, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις είναι οι ίδιες με αυτές που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Στην πλευρά της ανόδου, όμως, τα παραγόμενα ιόντα CO_3^{2-} δεν αντιδρούν με νερό, όπως προηγουμένως, αλλά διασπώνται εντός του ηλεκτρολύτη σε αέριο O_2 και αέριο CO_2 . Η εκροή της ανόδου είναι ένα μίγμα αυτών των δύο αερίων και αποτελεί την είσοδο της διάταξης του δεύτερου βήματος, η οποία είναι και πάλι μια ηλεκτροχημική κυψέλη. Η δεύτερη διάταξη απομονώνει από το εισερχόμενο μίγμα CO_2/O_2 τα αέρια του ως εξής: το μίγμα εισέρχεται στην πλευρά της καθόδου της κυψέλης· ο όξινος υδατικός ηλεκτρολύτης που υπάρχει μεταξύ καθόδου και ανόδου παρεμποδίζει τη μεταφορά του CO_2 ενώ επιτρέπει τη μεταφορά του O_2 δια μέσου του προς την άνοδο. Έτσι, από την έξοδο της πλευράς της ανόδου εξέρχεται καθαρό οξυγόνο, ενώ από την έξοδο της πλευράς της καθόδου εξέρχεται καθαρό CO_2 για να τροφοδοτήσει στη συνέχεια το στάδιο της αναγωγής (Eckart, 1996).

Εκτός από τις τέσσερις προαναφερθείσες, άλλες φυσικοχημικές τεχνικές παγίδευσης του CO₂ που έχουν προταθεί, αλλά δεν έχουν ακόμη δοκιμαστεί εν πτήσει, είναι: οι οσμωτικές μεμβράνες, οι ηλεκτρενεργές μεμβράνες, η ηλεκτροδιαπίδωση με ρητίνες ιοντοεναλλαγής, οι υγρές αμίνες, οι υδατικοί αλκαλικοί ηλεκτρολύτες και οι τηγμένοι ανθρακικοί ηλεκτρολύτες (Eckart, 1996).

Το CO₂ που συλλέγεται, τελικά, με κάποια από τις παραπάνω μεθόδους τροφοδοτεί το επόμενο στάδιο της διεργασίας κλεισίματος του κύκλου του οξυγόνου, δηλαδή το στάδιο της αναγωγής του CO₂. Οι κύριες τεχνολογίες που έχουν συζητηθεί για την υλοποίηση του σταδίου αναγωγής είναι δύο: η διεργασία Bosch και η διεργασία Sabatier (Eckart, 1996).

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας Bosch, το CO₂ αντιδρά, υπό την παρουσία καταλύτη, με υδρογόνο σε υψηλή θερμοκρασία (700-1000K), αποδίδοντας στερεό άνθρακα με τη μορφή γραφίτη, νερό και θερμότητα. Για την επιτάχυνση αυτής της αντίδρασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής καταλύτες: σίδηρος, νικέλιο, κράμα σιδήρου-νικελίου και κράμα ρουθηνίου-σιδήρου. Ο παραγόμενος στερεός άνθρακας επικάθεται στον καταλύτη, οπότε είναι αναγκαία η περιοδική αντικατάστασή του. Μια πιθανή βελτίωση αυτής της διεργασίας είναι η χρήση laser υψηλής ενέργειας για τη φωτοδιάσπαση (photodissociation) του CO₂ σε ατομικό C και ατομικό O. Κι αυτό γιατί η επακόλουθη αντίδραση του παραγόμενου O με το H₂ θα μπορούσε να γίνει σε αέρια, πλέον, κατάσταση, χωρίς την παρουσία καταλύτη. Και στις δύο περιπτώσεις, πάντως, το προϊόν των υδρατμών μπορεί, στη συνέχεια, είτε να συμπυκνωθεί και να αποθηκευθεί για κατανάλωση από το πλήρωμα είτε να οδηγηθεί στο επόμενο στάδιο, αυτό της παραγωγής οξυγόνου (Eckart, 1996).

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας Sabatier, το CO₂ αντιδρά, πάνω σε κοκκώδες υπόστρωμα καταλύτη ρουθηνίου, με υδρογόνο σε υψηλή θερμοκρασία (450-800K), αποδίδοντας μεθάνιο και νερό. Η αντίδραση αυτή πραγματοποιείται σε δύο στάδια: στο πρώτο στάδιο, το CO₂ αντιδρά με το H₂ και δίνει H₂O και CO· στο δεύτερο στάδιο, το CO αντιδρά ξανά με το H₂ και δίνει H₂O και CH₄. Το παραγόμενο μεθάνιο θα μπορούσε είτε να απορριφθεί από το διαστημικό σκάφος στο διάστημα είτε να αποθηκευθεί και να χρησιμοποιηθεί ως προωθητικό αέριο για διορθωτικές κινήσεις από το σύστημα ελέγχου του προσανατολισμού του σκάφους. Μια πιθανή βελτίωση αυτής της τεχνικής για να περισωθεί το υδρογόνο του μεθανίου θα ήταν η μετέπειτα πυρόλυση του μεθανίου σε πυρολυτικό γραφίτη και υδρογόνο. Τέλος, όπως και στην περίπτωση της διεργασίας Bosch, οι παραγόμενοι υδρατμοί μπορούν είτε να συμπυκνωθούν σε νερό και να αποθηκευθούν για κατανάλωση είτε να οδηγηθούν στην είσοδο του επόμενου σταδίου, αυτό της παραγωγής οξυγόνου (Eckart, 1996).

Το τελευταίο στάδιο στο φυσικοχημικό κλείσιμο του κύκλου του οξυγόνου, μετά την παγίδευση και την αναγωγή του CO₂ της ατμόσφαιρας του

διαστημικού σκάφους, είναι, φυσικά, η παραγωγή οξυγόνου. Η κυρίαρχη μέθοδος που εφαρμόζεται για τον σκοπό αυτό είναι η ηλεκτρόλυση του νερού, με διάφορες τεχνολογικές υλοποιήσεις, ενώ έχει προταθεί σαν λύση και η άμεση ηλεκτρόλυση του CO₂. Οι βασικές τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης του νερού είναι οι εξής: η ηλεκτρόλυση με τροφοδοσία στάσιμου νερού (static feed water electrolysis), η ηλεκτρόλυση νερού μέσω στερεού πολυμερούς (solid polymer water electrolysis) και η ηλεκτρόλυση υδρατμών (water vapor electrolysis) (Eckart, 1996).

Στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης με τροφοδοσία στάσιμου νερού (static feed water electrolysis), χρησιμοποιείται νερό υγιεινής για την παραγωγή οξυγόνου. Το νερό υγιεινής βρίσκεται σε ηρεμία μέσα σε μία δεξαμενή τροφοδοσίας και μπορεί να διαχέεται ως ατμός δια μέσου ενός λεπτού μητρώου αμίαντου το οποίο είναι εμποτισμένο σε ένα υγροσκοπικό υδατικό διάλυμα KOH που λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης. Αμέσως μετά το μητρώο αμίαντου το εν λόγω σύστημα εμπεριέχει μια διάταξη ηλεκτρολυτικής κυψέλης. Μεταξύ της ανόδου και της καθόδου αυτής της κυψέλης υπάρχει άλλο ένα μητρώο αμίαντου εμποτισμένο σε υδατικό διάλυμα KOH. Πριν την ηλεκτρόλυση, τα μητρώα της δεξαμενής νερού και της κυψέλης έχουν ίσες συγκεντρώσεις KOH. Με την έναρξη της ηλεκτρόλυσης στην κυψέλη, όμως, το νερό που εμπεριέχεται στο μητρώο μεταξύ των ηλεκτροδίων της αρχίζει να ηλεκτρολύεται, οπότε αυξάνεται η συγκέντρωση του KOH μέσα στο μητρώο της. Η αύξηση αυτή δημιουργεί μια κλίση συγκέντρωσης του KOH μεταξύ των μητρώων της δεξαμενής νερού και της κυψέλης, γεγονός το οποίο προκαλεί τη διάχυση υδρατμού από το πρώτο προς το δεύτερο. Ο υδρατμός αυτός συμπυκνώνεται σε νερό εντός του μητρώου της κυψέλης και ηλεκτρολύεται σε H₂ -στην πλευρά της καθόδου- και O₂ -στην πλευρά της ανόδου-. Η ανατροφοδότηση της δεξαμενής του νερού δεν γίνεται με συνεχή ροή, αλλά μέσω μιας εξωτερικής δεξαμενής αποθήκευσης νερού. Το παραγόμενο οξυγόνο αποθηκεύεται για να εμπλουτίσει την ατμόσφαιρα των αστροναυτών, ενώ το παραγόμενο υδρογόνο είτε απορρίπτεται από το διαστημικό σκάφος στο διάστημα είτε αποθηκεύεται για να ανατροφοδοτήσει σαν αντιδραστήριο το προηγούμενο στάδιο, αυτό της αναγωγής του CO₂ (Eckart, 1996).

Η ηλεκτρόλυση νερού μέσω στερεού πολυμερούς (solid polymer water electrolysis) χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη μια μεμβράνη πολυμερούς υπερφθοριωμένου σουλφονικού οξέως πάχους μερικών δεκάτων του χιλιοστού. Μόλις αυτό το πολυμερές κορεσθεί με νερό, μετατρέπεται σε έναν πολύ καλό ιοντικό αγωγό, γι' αυτό και αποτελεί τον μοναδικό ηλεκτρολύτη αυτής της διάταξης. Εκατέρωθεν της μεμβράνης του πολυμερούς τοποθετούνται δύο καταλυτικά ηλεκτρόδια: η κάθοδος και η άνοδος της ηλεκτρόλυσης. Από την πλευρά της καθόδου, η τροφοδοσία του νερού έρχεται σε άμεση επαφή με τη μεμβράνη του πολυμερούς. Η διαπερατότητα του πολυμερούς επιτρέπει στα μόρια του νερού να διαχυθούν από την κάθοδο προς την άνοδο, όπου διασπώνται ηλεκτροχημικά σε ιόντα υδρογόνου και

οξυγόνο. Στη συνέχεια, τα ιόντα υδρογόνου μετακινούνται και πάλι μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο, όπου συνδέονται με ελεύθερα ηλεκτρόνια και αποδίδουν αέριο υδρογόνο. Το αέριο υδρογόνο στην πλευρά της καθόδου διαλύεται, έτσι, στην τροφοδοσία νερού και αντλείται με εξειδικευμένη αντλία μικροβαρύτητας. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί είτε να απορριφθεί από το σκάφος είτε να ανατροφοδοτήσει το στάδιο της αναγωγής του CO₂, ενώ το παραγόμενο οξυγόνο αποθηκεύεται για να επιστραφεί ελεγχόμενα στην ατμόσφαιρα της καμπίνας (Eckart, 1996).

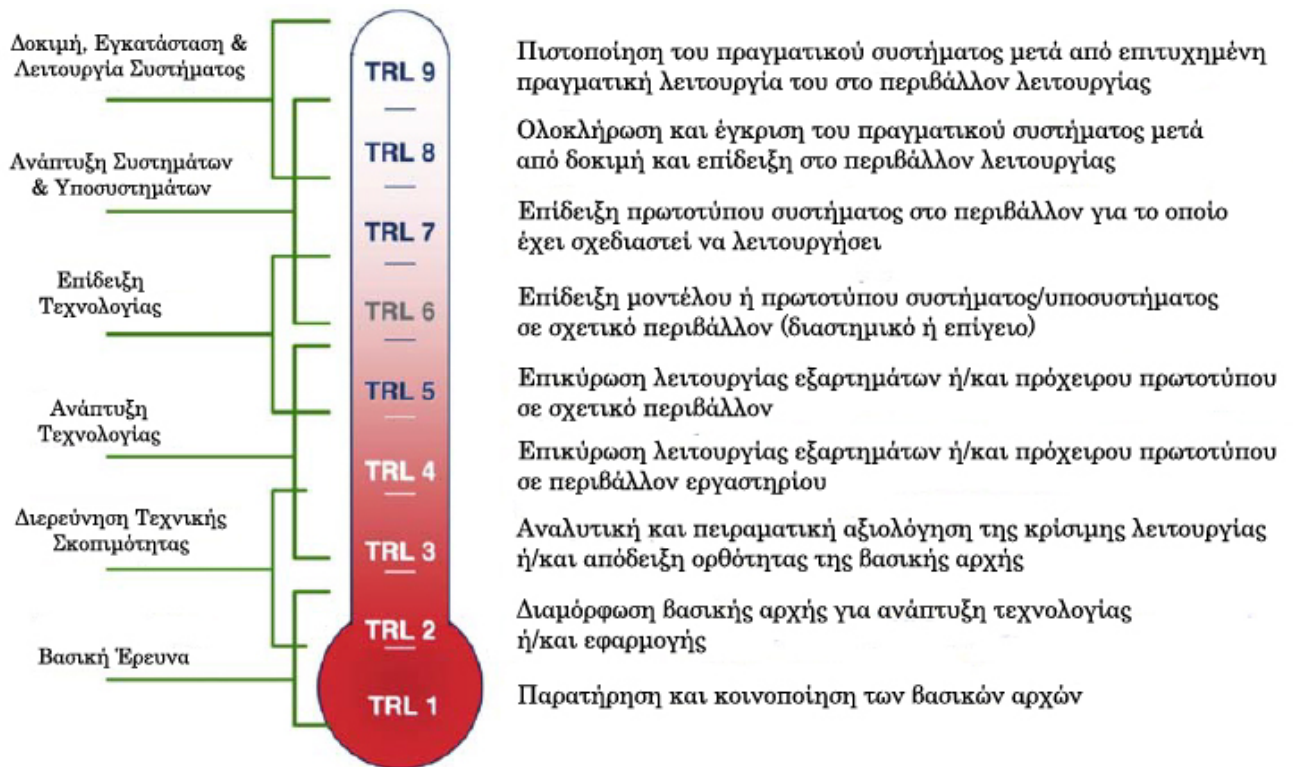
Στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης υδρατμών (water vapor electrolysis), η διεργασία της ηλεκτρόλυσης τροφοδοτείται συνήθως απευθείας από τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας της καμπίνας. Η ηλεκτρολυτική κυψέλη χρησιμοποιεί μία μικροπορώδη μεμβράνη, η οποία βρίσκεται πακτωμένη μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Και στις δύο πλευρές της μεμβράνης υπάρχει ένας όξινος ηλεκτρολύτης που παραμένει παγιδευμένος σε δύο στρώματα εξαιτίας αυτών των δύο ηλεκτροδίων. Ο αέρας της καμπίνας εισέρχεται από την πλευρά της ανόδου της κυψέλης, και τα μόρια του ατμού ηλεκτρολύονται από το στρώμα του όξινου ηλεκτρολύτη σε υδρογόνο -το οποίο διασχίζει τη μικροπορώδη μεμβράνη και συλλέγεται στην πλευρά της καθόδου- και σε οξυγόνο -το οποίο δεν μπορεί να διασχίσει τη μεμβράνη και άρα εμπλουτίζει τον εισερχόμενο αέρα στην πλευρά της ανόδου-. Ο εμπλουτισμένος με οξυγόνο αέρας εξέρχεται, έπειτα, και πάλι από την πλευρά της ανόδου και επιστρέφει πίσω στην καμπίνα. Το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται για μετέπειτα απόρριψη ή αξιοποίησή του σε κάποια άλλη διεργασία (Eckart, 1996).

Τέλος, η άμεση ηλεκτρόλυση του CO₂ χρησιμοποιεί έναν κεραμικό ηλεκτρολύτη για να απελευθερώσει το οξυγόνο από το CO₂ σε δύο στάδια. Εκατέρωθεν του ηλεκτρολύτη -που είναι στερεό οξειδίο- βρίσκονται δύο πορώδη καταλυτικά ηλεκτρόδια -η κάθοδος και η άνοδος- κατασκευασμένα από λευκόχρυσο. Στο πρώτο στάδιο, το CO₂ εισέρχεται στη διάταξη από την πλευρά της καθόδου και ανάγεται σε CO και ιόντα οξυγόνου. Εξαιτίας της διαπερατότητας του κεραμικού ηλεκτρολύτη, μόνο τα ιόντα οξυγόνου μπορούν να τον διασχίσουν και να φτάσουν ως στην άνοδο. Μόλις φτάσουν εκεί, τα ιόντα οξυγόνου αποδίδουν μοριακό οξυγόνο και ηλεκτρόνια. Σε αυτό το σημείο, το O₂ οδηγείται από την πλευρά της ανόδου προς αποθήκευση για εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας της καμπίνας, ενώ το CO και -πιθανόν- το εναπομείναν CO₂ τροφοδοτούνται από την πλευρά της καθόδου σε έναν δεύτερο αντιδραστήρα για το δεύτερο στάδιο της διεργασίας. Στον δεύτερο αντιδραστήρα, αυτό το μίγμα υφίσταται την αντίδραση Boudouard, όπου το CO μετατρέπεται μέσω ανακατανομής (disproportionation) σε γραφίτη και CO₂, υπό την παρουσία καταλυτικού σιδήρου, νικελίου ή κοβαλτίου. Ο γραφίτης εναποτίθεται στην επιφάνεια του καταλύτη, ενώ το παραγόμενο CO₂ ανατροφοδοτείται στην κυψέλη του κεραμικού ηλεκτρολύτη του προηγούμενου σταδίου για να υποστεί ξανά ηλεκτρόλυση (Eckart, 1996).

Στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι προαναφερθείσες φυσικοχημικές τεχνολογίες που υπάγονται στο υποσύστημα διαχείρισης ατμόσφαιρας και σχετίζονται με το κλείσιμο του κύκλου του οξυγόνου, μαζί με το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητάς τους (Technology Readiness Level, TRL). Σημειώνονται, επίσης, εκείνες οι τεχνολογίες που λειτουργούν αυτήν τη στιγμή εν πτήσει στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, ο οποίος είναι και το μοναδικό -προς το παρόν- ανθρώπινο ενδιαίτημα εκτός της γήινης βιόσφαιρας. Στο **Σχήμα 2.4** παρατίθεται η επεξήγηση της κλίμακας αξιολόγησης του επιπέδου τεχνολογικής ωριμότητας (TRL), σύμφωνα με την στρατηγική ανάπτυξης τεχνολογίας της NASA (Mankins, 2009).

| Υποσύστημα Διαχείρισης Ατμόσφαιρας | Τεχνολογία | TRL | Τεχνολογία Ενεργή στον ISS; |
|---|---|-----|-----------------------------|
| Στάδιο Παγίδευσης CO₂ | Μοριακά κόσκινα δύο στρωμάτων | 4-5 | ✗ |
| | Μοριακά κόσκινα τεσσάρων στρωμάτων | 9 | ✓ |
| | Στερεές αμίνες εκρόφησης νερού | 6 | ✗ |
| | Αποπολωμένοι ηλεκτροχημικοί συμπυκνωτές | 6 | ✗ |
| | Πολωμένοι συμπυκνωτές αέρα | 6 | ✗ |
| Στάδιο Αναγωγής CO₂ | Διεργασία Bosch | 6 | ✗ |
| | Διεργασία Sabatier | 9 | ✓ |
| Στάδιο Παραγωγής O₂ | Ηλεκτρόλυση με τροφοδοσία στάσιμου νερού | 9 | ✗ |
| | Ηλεκτρόλυση νερού μέσω στερεού πολυμερούς | 9 | ✓ |
| | Ηλεκτρόλυση υδρατμών | 4-5 | ✗ |
| | Άμεση ηλεκτρόλυση CO ₂ | 4-5 | ✗ |

Πίνακας 2. 1: Φυσικοχημικές τεχνολογίες για ανάκτηση O₂ στο υποσύστημα διαχείρισης ατμόσφαιρας και εκτίμηση του TRL αυτών. Προσαρμογή από (Jones, et al., 2014) (Jones & Kliss, 2010) (Nathanson, et al., 2011)



Σχήμα 2. 4: Κλίμακα αξιολόγησης του επιπέδου τεχνολογικής ωριμότητας (TRL), σύμφωνα με την στρατηγική ανάπτυξης τεχνολογίας της NASA. Προσαρμογή από (Mankins, 2009)

Διαχείριση νερού: Ο ρόλος του υποσυστήματος διαχείρισης νερού είναι ο διαρκής έλεγχος και η εξυγίανση του νερού που καταναλώνουν και αποβάλλουν οι αστροναύτες κατά την κάλυψη τόσο των μεταβολικών αναγκών τους όσο και των αναγκών υγιεινής. Αναφορικά με το κλείσιμο του κύκλου του νερού, που είναι και η κύρια λειτουργία του εν λόγω υποσυστήματος, τα τρία στάδια επεξεργασίας των λυμάτων για ανάκτηση νερού διαφορετικών χρήσεων είναι: η ανάκτηση νερού από τα ούρα, η ανάκτηση νερού υγιεινής και η ανάκτηση πόσιμου νερού από το συμπύκνωμα ατμοσφαιρικής υγρασίας. Παράλληλα, το υποσύστημα διαχείρισης νερού είναι υπεύθυνο και για την παρακολούθηση των δεικτών όλων των παραμέτρων της ποιότητας του νερού των διαφόρων χρήσεων, όπως για παράδειγμα της γεύσης του, της περιεκτικότητάς του σε αμμωνία, του pH του, του συνολικού οργανικού του άνθρακα, της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας και του μικροβιακού του φορτίου. Δευτερεύουσας σημασίας θεωρούνται οι παράμετροι του χρώματος, της οσμής, της θολότητας, του αφρισμού και της συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων, γι' αυτό και δεν παρακολουθούνται τόσο συχνά (Eckart, 1996) (Wieland, 1994).

Για την ανάκτηση του νερού από τα ούρα των αστροναυτών, οι κύριες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί είναι: η απόσταξη με συμπίεση υδρατμών (vapor compression distillation), η καταλυτική απομάκρυνση αμμωνίας

αέριας φάσης (vapor phase catalytic ammonia removal), το ενοποιημένο θερμοηλεκτρικό σύστημα εξατμιστήρα μεμβράνης (thermoelectric integrated membrane evaporation system) και το σύστημα εξάτμισης αέρα (air evaporation system) (Eckart, 1996).

Στην περίπτωση της απόσταξης με συμπίεση υδρατμών (vapor compression distillation), ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, τα ούρα εισέρχονται σε έναν εξατμιστήρα, όπου το νερό που εμπεριέχεται σε αυτά απελευθερώνεται με τη μορφή υδρατμών, αφήνοντας ένα συμπυκνωμένο υπόλειμμα με πάνω από 50% περιεκτικότητα σε στερεά. Έπειτα, οι υδρατμοί οδηγούνται σε έναν συμπιεστή, όπου συμπιέζονται με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας κορεσμού τους. Στη συνέχεια, οι συμπιεσμένοι υδρατμοί οδηγούνται σε έναν συμπυκνωτή, ο οποίος βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον αρχικό εξατμιστήρα, όπου αποδίδουν τη λανθάνουσα θερμότητά τους με σκοπό την εξάτμιση της επόμενης ποσότητας νερού από ούρα, ενώ παράλληλα συμπυκνώνονται σε νερό. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ανάκτηση περισσότερου από το 96% του νερού που εμπεριέχεται στα ούρα. Μόλις το συμπυκνωμένο υπόλειμμα που παραμένει στον εξατμιστήρα φτάσει μια προκαθορισμένη περιεκτικότητα σε στερεά, απομακρύνεται από το σύστημα και αποθηκεύεται ως άλμη. Η ποιότητα του νερού που ανακτάται με αυτήν τη μέθοδο εξαρτάται, βεβαίως, από την περιεκτικότητά του σε πτητικές οργανικές ενώσεις και αμμωνία, καθώς η εξάτμιση και η συμπύκνωσή του δεν αρκεί για να το διαχωρίσει από αυτά. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητη η προεπεξεργασία των ούρων με οξύ, προκειμένου να σταθεροποιηθεί η ουρία ώστε να αποφευχθεί η διάσπασή της σε αμμωνία εντός της διάταξης. Ακόμη, μια μετεπεξεργασία του παραγόμενου νερού μπορεί επίσης να είναι απαραίτητη πριν την επαναχρησιμοποίησή του, αναλόγως της ποιότητάς του (Eckart, 1996).

Η καταλυτική απομάκρυνση αμμωνίας αέριας φάσης (vapor phase catalytic ammonia removal) βασίζεται σε μια καταλυτική χημική διεργασία, κατά τη διάρκεια της οποίας οι προσμείξεις -αμμωνία και άλλες οργανικές ενώσεις- που εξατμίζονται από τα ούρα μαζί με το νερό οξειδώνονται σε ακίνδυνα αέρια προϊόντα. Αρχικά, τα ούρα εισέρχονται, χωρίς καμία προεπεξεργασία, σε έναν εξατμιστήρα που περιέχει μια δέσμη μεμβρανών κοίλων ινών (hollow fiber membranes), η οποίες κατασκευάζονται από ένα υπερφθωριωμένο ιοντοανταλλακτικό πολυμερές. Τα ούρα εισέρχονται στο εσωτερικό αυτών των κοίλων μεμβρανών και εξατμίζονται από το εξωτερικό τους. Στη συνέχεια, τα εξατμισμένα ούρα εισέρχονται στο πρώτο καταλυτικό στρώμα, όπου η αεριοποιημένη NH_3 οξειδώνεται καταλυτικά στους 523K, με τη βοήθεια κόκκων κράματος λευκόχρυσου και αλουμίνας, και αποδίδει ένα μίγμα N_2 και N_2O . Στο ίδιο καταλυτικό στρώμα οξειδώνονται και οι πτητικοί υδρογονάνθρακες σε CO_2 και H_2O . Έπειτα, το μίγμα των ατμών εισέρχεται σε ένα σύστημα συμπύκνωσης των υδρατμών και διαχωρισμού τους από τα άλλα αέρια. Τα άλλα αέρια εισέρχονται, τέλος, σε ένα δεύτερο καταλυτικό στρώμα,

όπου το N_2O αποσυντίθεται καταλυτικά στους 723K, με τη βοήθεια κόκκων κράματος ρουθηνίου και αλουμίνας, και αποδίδει ένα μίγμα N_2 και O_2 . Τα παραγόμενα αέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας του σκάφους, ενώ το ανακτώμενο νερό, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών της διάταξης, δεν περιέχει μικροοργανισμούς, και η περιεκτικότητά του σε αμμωνία και άλλους υδρογονάνθρακες είναι αρκετά χαμηλή. Επίσης, χαμηλή είναι και η αγωγιμότητά του, γι' αυτό και απαιτείται μόνο μια διόρθωση του pH έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι παράμετροι που το καθιστούν κατάλληλο για πόση, χωρίς καμία άλλη μετεπεξεργασία. Και σε αυτήν την περίπτωση επιτυγχάνεται ανάκτηση της τάξης του 95% του νερού που εμπεριέχεται στα ούρα (Eckart, 1996).

Το ενοποιημένο θερμοηλεκτρικό σύστημα εξατμιστήρα μεμβράνης (thermoelectric integrated membrane evaporation system) λειτουργεί με την παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, τα ούρα υφίστανται μια προεπεξεργασία με όζον και θειικό οξύ έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί η αμμωνία, να ανασταλεί η ανάπτυξη των μικροοργανισμών και να ελαττωθούν οι οσμές και ο αφρισμός τους. Η χρήση του όζοντος σε αυτή τη φάση θα μπορούσε δυνητικά να αντικατασταθεί με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας. Μετά την προεπεξεργασία, τα ούρα εισέρχονται σε δύο παράλληλους εναλλάκτες θερμότητας που εφάπτονται με τη θερμή πλευρά μιας θερμοηλεκτρικής αντλίας θερμότητας. Εκεί, τα ούρα θερμαίνονται στους 339K και έπειτα εισέρχονται στον εξατμιστήρα που αποτελείται εξακόσιες μεμβράνες κοίλων ινών κατασκευασμένες από Nafion. Τα ούρα εξατμίζονται από την εξωτερική επιφάνεια αυτών των ινών και οδηγούνται σε έναν συμπυκνωτή, ο οποίος αποτελείται από μία πορώδη επίπεδη επιφάνεια που εφάπτεται με την ψυχρή πλευρά της θερμοηλεκτρικής αντλίας θερμότητας. Διασχίζοντας τον συμπυκνωτή, τα εξατμισμένα ούρα συμπυκνώνονται μερικώς και καταλήγουν, τελικά, σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου και αποβάλλουν τη λανθάνουσα θερμότητά τους και υγροποιούνται. Η ποιότητα του συμπυκνώματος ελέγχεται και, στην περίπτωση που είναι αποδεκτή, το συμπύκνωμα επιστρέφει στο σκάφος για χρήση μέσω μιας αντλίας που διαχωρίζει ταυτόχρονα τις αέριες προσμείξεις από το υγρό. Αν η ποιότητα του συμπυκνώματος δεν είναι αποδεκτή, το υγρό ανατροφοδοτείται στη διαδικασία για να υποστεί ξανά επεξεργασία. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να ανακτηθεί το 93% του νερού που εμπεριέχεται στα ούρα, ενώ η εναπομείνουσα άλμη μπορεί να φτάσει περιεκτικότητα 38% σε στερεά. Βεβαίως, όπως και στην περίπτωση της απόσταξης με συμπύεση υδρατμών, η ποιότητα του παραγόμενου νερού εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε αμμωνία και πτητικές οργανικές ενώσεις, αφού αυτά δεν εξουδετερώνονται με κάποιον τρόπο από τη διάταξη. Για τον λόγο αυτό, φαίνεται να είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία των ούρων για τη σταθεροποίηση της ουρίας πριν διασπαστεί σε αμμωνία, αλλά και η μετεπεξεργασία του παραγόμενου νερού για την απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων που συμπυκνώθηκαν μαζί του (Eckart, 1996).

Στην περίπτωση του συστήματος εξάτμισης αέρα (air evaporation system), τα ούρα διασχίζουν ένα φίλτρο σωματιδίων και καταλήγουν σε μία δέσμη θρυαλλίδων. Εκεί, τα ούρα εμποτίζουν τις θρυαλλίδες και υφίστανται εξάτμιση από την επιφάνειά τους, χάρη σε έναν κυκλοφορητή θερμού αέρα, αφήνοντας σε αυτές το στερεό τους υπόλειμμα. Η ποσότητα των ούρων που εισέρχονται παλμικά στη δέσμη των θρυαλλίδων ελέγχεται ενεργά από ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο παρακολουθεί και λαμβάνει υπόψη τη σχετική υγρασία του αέρα που εξέρχεται από το στάδιο των θρυαλλίδων. Ο υγρός αέρας που εξέρχεται από τις θρυαλλίδες διασχίζει έναν εναλλάκτη θερμότητας που προκαλεί συμπύκνωση των ατμών. Το παραγόμενο συμπύκνωμα υφίσταται μικροβιακό έλεγχο και καταλήγει σε μια μονάδα μετεπεξεργασίας για να αφαιρεθούν οι ιχνοποσότητες ρύπων που περιέχει, προτού αποθηκευθεί για χρήση από το πλήρωμα. Η δέσμη των θρυαλλίδων πρέπει, φυσικά, να υφίσταται τακτική αντικατάσταση, εξαιτίας της συσσώρευσης όλων των στερεών υπολειμμάτων των ούρων εντός της. Η ανάκτηση νερού από τα ούρα με αυτήν τη μέθοδο της σταδιακής τους ξήρανσης μπορεί να αγγίξει και το 100% (Eckart, 1996).

Αξίζει, τέλος, να παρατεθεί και ένα σύστημα που μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά ως προς τα προηγούμενα: το σύστημα μετεπεξεργασίας καταλυτικής οξειδωσης υδατικής φάσης (aqueous phase catalytic oxidation post-treatment system). Το σύστημα αυτό μπορεί να αφαιρέσει μέσω οξειδωσης τους οργανικούς ρύπους κατά το στάδιο της μετεπεξεργασίας του νερού που ανακτάται από τα ούρα με κάποια από τις προαναφερθείσες τεχνικές. Το ανακτημένο νερό θερμαίνεται μαζί με τις οργανικές προσμίξεις του και αντιδρά σε αέρια φάση με καθαρό οξυγόνο υπό την παρουσία καταλύτη. Μετά την αντίδραση, το μίγμα υφίσταται ψύξη και οι υδρατμοί υγροποιούνται, ενώ το αέριο CO₂ που παράγεται κατά την καταλυτική καύση των οργανικών ενώσεων διαχωρίζεται πλέον εύκολα από το μετεπεξεργασμένο νερό (Eckart, 1996).

Για την ανάκτηση, τώρα, του νερού από τις εγκαταστάσεις υγιεινής του διαστημικού σκάφους -ντουζιέρα και νιπτήρες- και τον καθαρισμό του από τις προσμίξεις ρύπων, οι κύριες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί είναι: η αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis) και το φιλτράρισμα πολλαπλών σταδίων (multifiltration) (Eckart, 1996).

Η διεργασία αντίστροφης όσμωσης (reverse osmosis) λειτουργεί ως ακολούθως. Αρχικά, τα λύματα υγιεινής θερμαίνονται στους 347K ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών. Έπειτα, υφίστανται μια προεπεξεργασία με υπερφιλτράρισμα (ultrafiltration), κατά τη διάρκεια του οποίου απομακρύνονται από το νερό τα αιωρούμενα στερεά και μακρομόρια, ενώ παραμένουν διαλυμένα σε αυτό τα άλατα με μικρό μοριακό βάρος. Ο σκοπός αυτής της προεπεξεργασίας είναι η παρακράτηση των ρύπων μεγάλων μεγέθους από τη μεμβράνη υπερφιλτραρίσματος, έτσι ώστε

να αποφευχθεί η εναπόθεση βλαβερών ακαθαρσιών επί των ευαίσθητων μεμβρανών της αντίστροφης όσμωσης, που είναι και το κύριο στάδιο επεξεργασίας. Στη συνέχεια, οι εναπομείναντες ρύποι στη διάταξη υπερφιλτραρίσματος αποθηκεύονται ως άλμη, ενώ το φιλτραρισμένο νερό, μαζί με τις εμπεριεχόμενες χημικές ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους, εισάγεται στον έναν θάλαμο ενός δοχείου δύο θαλάμων. Ο δεύτερος θάλαμος, που χωρίζεται από τον πρώτο μέσω μίας ημιδιαπερατής μεμβράνης, εμπεριέχει ένα αραιότερο διάλυμα από αυτό που εισέρχεται στον πρώτο. Ασκώντας δύναμη στο διάλυμα του φιλτραρισμένου νερού του πρώτου θαλάμου μέχρις ότου να ξεπεραστεί η οσμωτική του πίεση, επιτυγχάνεται, χάρη στην αντίστροφη όσμωση, η μετακίνηση του νερού από το πυκνότερο διάλυμα νερού προς το αραιότερο. Αυτό το νερό που οδηγείται στον δεύτερο θάλαμο είναι αρκετά καθαρό και εμπεριέχει μόνο έναν μικρό αριθμό οργανικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους, καθώς με την αντίστροφη όσμωση παρακρατούνται στον πρώτο θάλαμο τα περισσότερα από τα άλατα που παρέμεναν διαλυμένα σε αυτό. Όπως γίνεται κατανοητό, η κατασκευή της ημιδιαπερατής μεμβράνης είναι το πιο κρίσιμο σημείο αυτής της τεχνολογίας. Για το στάδιο της αντίστροφης όσμωσης, οι μεμβράνες που φαίνεται να ενέχουν τις καλύτερες προοπτικές για χρήση στο διάστημα είναι οι μεμβράνες κοίλων ινών (*hollow fiber membranes*) και οι μεμβράνες δύο επιπέδων (*dual layer membranes*). Τέλος, το παραγόμενο νερό οδηγείται σε ένα στάδιο φιλτραρίσματος πολλαπλών σταδίων για μια μετεπεξεργασία με τη χρήση προσροφητικών υλικών, πριν αποθηκευθεί για χρήση από το πλήρωμα (Eckart, 1996).

Στη δεύτερη τεχνολογία ανάκτησης νερού από τα λύματα υγιεινής, δηλαδή στο φιλτράρισμα πολλαπλών σταδίων (*multifiltration*), διακρίνουμε τρία βασικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, τα λύματα υγιεινής διασχίζουν ένα φίλτρο που κατακρατά τα εμπεριεχόμενα σωματίδια. Έπειτα, στο δεύτερο στάδιο, οι αιωρούμενοι οργανικοί ρύποι εξουδετερώνονται με τη χρήση ενός στρώματος ενεργού άνθρακα. Τέλος, στο τρίτο στάδιο, τα ανόργανα άλατα απομακρύνονται με τη χρήση ενός στρώματος ρητίνης ιοντοεναλλαγής. Αξίζει να αναφέρουμε ότι τα τρία αυτά στάδια υλοποιούνται μέσα σε ένα μοναδικό φυσίγγιο. Μία διάταξη ανάκτησης νερού με αυτήν την τεχνολογία χρησιμοποιεί έξι τέτοια φυσίγγια τριών σταδίων, τα οποία τοποθετούνται σειριακά κατά τη φορά ροής των λυμάτων υγιεινής. Αυτή η τμηματική υλοποίηση της διάταξης με τη χρήση φυσιγγίων καθιστά, βεβαίως, ευκολότερη την περιοδική αντικατάστασή τους. Φυσικά, για να εμποδιστεί η ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών εντός του συστήματος, τα λύματα υγιεινής είτε προθερμαίνονται σε θερμοκρασία 347K είτε υφίστανται χημική επεξεργασία μέσω έγχυσης ιωδίου (Eckart, 1996).

Για την ανάκτηση, τέλος, του πόσιμου νερού από τη συμπύκνωση των υδρατμών της ατμόσφαιρας της καμπίνας, οι κύριες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί είναι: η αντίστροφη όσμωση (*reverse osmosis*), το φιλτράρισμα

πολλαπλών σταδίων (multifiltration) και η ηλεκτροδιαπίδυση (electrodialysis) (Eckart, 1996).

Οι δύο πρώτες τεχνολογίες -αντίστροφη όσμωση και φιλτράρισμα πολλαπλών σταδίων- είναι στην ουσία οι ίδιες με αυτές που περιγράφηκαν ανωτέρω για την ανάκτηση νερού υγιεινής από τα λύματα υγιεινής. Η μόνη διαφορά είναι η επιπλέον προσθήκη ενός σταδίου μετεπεξεργασίας του παραγόμενου νερού με ένα στρώμα προσρόφησης αλκοολών, το οποίο επιτυγχάνει και την παρακράτηση των διαλυμένων οργανικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους (Eckart, 1996) (Ferrall, et al., 1994).

Η διεργασία της ηλεκτροδιαπίδυσης (electrodialysis) χρησιμοποιεί ρητίνες ιοντοεναλλαγής και μεμβράνες ιοντοεναλλαγής για να αφιονίσει το νερό που δέχεται ως είσοδο. Η διάταξη αποτελείται από τρεις θαλάμους, ο διαχωρισμός των οποίων γίνεται από τις προαναφερθείσες μεμβράνες ιοντοεναλλαγής. Αρχικά, το συμπύκνωμα της ατμοσφαιρικής υγρασίας εισέρχεται στον μεσαίο θάλαμο, ο οποίος είναι γεμάτος με κόκκους ρητίνης ιοντοεναλλαγής μικτού στρώματος (mixed-bed ion-exchange resin). Στα τοιχώματα των δύο άλλων θαλάμων που βρίσκονται εκατέρωθεν αυτού εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού που δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της διάταξης. Τα ιόντα που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό αντιδρούν με τους κόκκους της ρητίνης του μεσαίου θαλάμου και παρακρατούνται από αυτούς, καθώς το νερό ρέει από την έξοδο του θαλάμου αυτού. Έπειτα, τα ιόντα που παρακρατούνται από τους κόκκους ρητίνης κινούνται μέσα στο πεδίο, λόγω του ηλεκτρικού φορτίου τους, προς κάθε έναν από τους δύο παράπλευρους θαλάμους. Χάρη στην ημιδιαπερατότητα των μεμβρανών ιοντοεναλλαγής που διαχωρίζουν τον κεντρικό θάλαμο από τους παράπλευρους, αλλά και του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, όλα τα κατιόντα συσσωρεύονται στον έναν θάλαμο και όλα τα ανιόντα στον άλλον. Τα μόρια του νερού αδυνατούν να διασχίσουν τις μεμβράνες. Με τον τρόπο αυτό, η διάταξη εξάγει αφιονισμένο νερό από τον κεντρικό της θάλαμο και άλμη από τους δύο άλλους, ενώ, παράλληλα, οι κόκκοι της ρητίνης καθαρίζονται διαρκώς από τους ρύπους, χάρη στο συνεχές ρεύμα που δημιουργείται από το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Βέβαια, η μέθοδος αυτή αδυνατεί να παρακρατήσει τους μη ιοντικούς οργανικούς ρύπους, οπότε χρειάζεται μια προεπεξεργασία ή μετεπεξεργασία του νερού που να αντιμετωπίζει αυτό το ζήτημα (Eckart, 1996).

Στον **Πίνακα 2.2** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι προαναφερθείσες φυσικοχημικές τεχνολογίες που υπάγονται στο υποσύστημα διαχείρισης νερού και σχετίζονται με το κλείσιμο του κύκλου του νερού, μαζί με το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητάς τους (Technology Readiness Level, TRL). Σημειώνονται, επίσης, εκείνες οι τεχνολογίες που λειτουργούν αυτήν τη στιγμή εν πτήσει στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, ο

οποίος -υπενθυμίζουμε- είναι και το μοναδικό -προς το παρόν- ανθρώπινο ενδιαίτημα εκτός της γήινης βιόσφαιρας.

| Υποσύστημα Διαχείρισης Νερού | Τεχνολογία | TRL | Τεχνολογία Ενεργή στον ISS; |
|---|--|-----|-----------------------------|
| Στάδιο Ανάκτησης Νερού από Ούρα | Απόσταξη με συμπίεση υδρατμών | 9 | ✓ |
| | Καταλυτική απομάκρυνση αμμωνίας αέριας φάσης | 6 | ✗ |
| | Ενοποιημένο θερμοηλεκτρικό σύστημα εξατμιστήρα μεμβράνης | 4-5 | ✗ |
| | Σύστημα εξάτμισης αέρα | 5 | ✗ |
| Στάδιο Ανάκτησης Νερού Υγιεινής | Αντίστροφη Όσμωση | 6 | ✗ |
| | Φιλτράρισμα Πολλαπλών Σταδίων | 9 | ✓ |
| Στάδιο Ανάκτησης Πόσιμου Νερού από Συμπύκνωμα Ατμοσφαιρικής Υγρασίας | Αντίστροφη Όσμωση | 6 | ✗ |
| | Φιλτράρισμα Πολλαπλών Σταδίων | 9 | ✓ |
| | Ηλεκτροδιαπίδυση | 4-5 | ✗ |

Πίνακας 2. 2: Φυσικοχημικές τεχνολογίες για ανάκτηση H₂O στο υποσύστημα διαχείρισης νερού και εκτίμηση του TRL αυτών. Προσαρμογή από (Jones, et al., 2014) (Jones & Kliss, 2010) (Nathanson, et al., 2011)

Διαχείριση αποβλήτων: Ο ρόλος του υποσυστήματος διαχείρισης αποβλήτων είναι η συλλογή, η επεξεργασία, η αποθήκευση των αποβλήτων που παράγονται σε ένα διαστημικό σκάφος ή σε έναν διαστημικό σταθμό και, όπου είναι δυνατόν, η ανάκτηση χρήσιμων πόρων από αυτά. Οι κύριοι τύποι αποβλήτων που καλείται να διαχειριστεί αυτό το υποσύστημα είναι τα στερεά, ημιστερεά και μικτής μορφής βιολογικά απόβλητα, η συμπυκνωμένη άλμη που παράγεται από το υποσύστημα διαχείρισης νερού, καθώς και τα στερεά

σωματίδια και οι αέριοι ρύποι που απορροφώνται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του υποσυστήματος διαχείρισης ατμόσφαιρας. Προτού ανακτηθούν θρεπτικά συστατικά, νερό και CO₂ από τα απόβλητα για να χρησιμοποιηθούν, πιθανώς, ως πόροι για την ανάπτυξη βρώσιμων φυτικών οργανισμών -όπως θα δούμε στην **Ενότητα 2.3-**, το υποσύστημα διαχείρισης αποβλήτων οφείλει να περατώσει πρωτίστως το στάδιο της επεξεργασίας τους (Eckart, 1996) (Wieland, 1994).

Οι κύριες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για αυτόν τον σκοπό είναι: η υγρή οξείδωση σε υπερκρίσιμες συνθήκες (supercritical wet oxidation), η υγρή οξείδωση (wet oxidation), η καύση (combustion, incineration), η ηλεκτροχημική οξείδωση (electrochemical incineration) και το σύστημα ανάκτησης νερού από απόβλητα (waste management – water system) (Eckart, 1996).

Η υγρή οξείδωση σε υπερκρίσιμες συνθήκες (supercritical wet oxidation), χρησιμοποιεί νερό σε υπερκρίσιμη κατάσταση, δηλαδή σε συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης μεγαλύτερες από 647K και 22.1MPa, προκειμένου να εξουδετερώσει μέσω οξείδωσης τις οργανικές ενώσεις των αποβλήτων. Χάρη στις ιδιαίτερες διαλυτικές ιδιότητες που εμφανίζει το νερό σε αυτήν την κατάσταση, επιτυγχάνεται η διάλυση οργανικών ενώσεων εντός του, οι οποίες σε άλλη περίπτωση θα παρέμεναν αδιάλυτες. Η επιπρόσθετη διάλυση οξυγόνου στο υπερκρίσιμο νερό οδηγεί σε οξείδωση αυτών των αντιδρώντων σε μία και μόνο φάση, χωρίς την παρουσία καταλύτη. Μάλιστα, στην περίπτωση που οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης είναι μεγαλύτερες από 922K και 25.3MPa, οι οργανικές ενώσεις και οι πιθανές ιχνοποσότητες αέριων ρύπων από το υποσύστημα διαχείρισης ατμόσφαιρας δύνανται να οξειδωθούν πλήρως σε CO₂, H₂ και N₂. Τα ανόργανα άλατα παρουσιάζουν μέτρια διαλυτότητα στο υπερκρίσιμο νερό, γεγονός το οποίο υποβοηθά τον διαχωρισμό τους από το διάλυμα μέσω της καθίζησης. Τα οργανικά άλατα, από την άλλη, δύνανται να οξειδωθούν με απόδοση μεγαλύτερη από 99.99% και σε χρονική διάρκεια μικρότερη του ενός λεπτού. Η υγρή οξείδωση σε υπερκρίσιμες συνθήκες μπορεί να διαχειριστεί κάθε ροή αποβλήτων του διαστημικού σκάφους, και το προϊόν της είναι η εκροή πόσιμου νερού. Μια επιπλέον μετεπεξεργασία του παραγόμενου νερού θα ήταν χρήσιμη για την αφαίρεση πιθανών ιχνοποσοτήτων τοξικών αέριων ρύπων που επιβιώνουν από την κύρια διεργασία (Eckart, 1996).

Στην περίπτωση της υγρής οξείδωσης (wet oxidation), είναι δυνατόν να οξειδωθεί υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ένα υδαρές μίγμα βιολογικών αποβλήτων, είτε συμπυκνωμένο είτε αραιό, με περιεκτικότητα σε στερεά που κυμαίνεται από 1 έως 10%. Η οξείδωση γίνεται σε περιβάλλον είτε ατμοσφαιρικού αέρα είτε καθαρού οξυγόνου, υπό πίεση περίπου 14MPa και θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 473K και 573K, και τα κύρια προϊόντα της αντίδρασης είναι CO₂ και νερό. Με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατόν να

οξειδωθούν όχι μόνο ξηραμένα αλλά και αρκετά αραιά υδαρή απόβλητα με περιεκτικότητα σε στερεά που μπορεί να φτάσει το 5%. Η διεργασία αυτή, αν και δεν οξειδώνει τόσο αποτελεσματικά τις οργανικές ενώσεις όπως η υγρή οξείδωση σε υπερκρίσιμες συνθήκες, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του διαλυμένου άνθρακα κατά 60-95% της αρχικής ποσότητας. Επίσης, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τα ανόργανα άλατα καθιζάνουν στο διάλυμα και μπορούν να ανακτηθούν για να χρησιμοποιηθούν ως πόροι. Τέλος, η μικρή ποσότητα τέφρας που παράγεται σαν παραπροϊόν είναι αδρανής και μη βιοδιασπώμενη. Βέβαια, εξαιτίας της ατελούς οξείδωσης που μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας, θα ήταν απαραίτητη μια μετεπεξεργασία των παραγόμενων αερίων και του νερού μέσω ενός σταδίου καταλυτικής οξείδωσης (Eckart, 1996).

Η καύση (combustion, incineration) είναι η ταχεία εξώθερμη οξείδωση των καύσιμων ενώσεων. Στην περίπτωση της επεξεργασίας των βιολογικών αποβλήτων ενός διαστημικού σκάφους ή διαστημικού σταθμού, έχει εξεταστεί τόσο η πλήρης όσο και η ατελής καύση του υλικού, αφού έχει προηγηθεί η ξήρασή του. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας πλήρους καύσης, τα εισερχόμενα απόβλητα υφίστανται εξάτμιση, μέχρις ότου η περιεκτικότητά τους σε στερεά να φτάσει το 50% w/w. Έπειτα, τα ξηραμένα απόβλητα θερμαίνονται υπό την παρουσία περίσσειας αέρα ή οξυγόνου σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασία περίπου 813K. Τα τελικά παράγωγα της ξηρής πλήρους καύσης είναι αδρανή και αποτελούνται κυρίως από συμπύκνωμα υδρατμών, ανόργανη τέφρα και αέρια καύσης, κυρίως CO₂. Ένα στάδιο μετεπεξεργασίας σε καταλυτικό καυστήρα θα μπορούσε να μειώσει τα παράπλευρα προϊόντα ατελούς καύσης και να αυξήσει την απόδοση της διεργασίας. Το παραγόμενο νερό, φυσικά, θα χρειαζόταν επίσης ένα στάδιο μετεπεξεργασίας, προτού επιστραφεί στο πλήρωμα για χρήση. Στην περίπτωση της ατελούς καύσης, χρειάζεται και πάλι η ξήραση των αποβλήτων στα επίπεδα που προαναφέρθηκαν. Η ατελής καύση χρησιμοποιεί λιγότερο οξυγόνο στο κύριο στάδιο, αλλά χρειάζεται, όπως και η πλήρης, ένα στάδιο μετεπεξεργασίας καταλυτικής οξείδωσης. Ακόμη, στην περίπτωση της πλήρους καύσης των αζωτούχων ενώσεων παράγονται κυρίως νιτρικά ιόντα, ενώ στην περίπτωση της ατελούς παράγεται κυρίως αμμωνία, η οποία μετατρέπεται σε μοριακό άζωτο και νερό στο στάδιο της μετεπεξεργασίας (Eckart, 1996).

Η ηλεκτροχημική οξείδωση (electrochemical incineration) είναι μια μη θερμική ηλεκτρολυτική διεργασία, η οποία οξειδώνει τα στερεά και υγρά απόβλητα σε CO₂, O₂, N₂ και H₂, με τη χρήση καταλυτικών ηλεκτροδίων. Η διεργασία αυτή συντελείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 422K και μπορεί να οξειδώσει τα βιολογικά απόβλητα χωρίς την κατανάλωση ατμοσφαιρικού οξυγόνου, γεγονός το οποίο κάνει πολύ ελκυστική την περαιτέρω ανάπτυξη της (Eckart, 1996).

Το σύστημα ανάκτησης νερού από απόβλητα (waste management – water system) έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται ταυτόχρονα τόσο το ρεύμα των στερεών όσο και αυτό των υγρών αποβλήτων. Αυτή του η δυνατότητα το καθιστά κατάλληλο για την ανάκτηση νερού από την άλμη και από τα άλλα συμπυκνώματα που προκύπτουν ως εκροές διεργασιών προηγούμενων υποσυστημάτων του συστήματος υποστήριξης ζωής. Η ανάκτηση του νερού επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός εξατμιστήρα, στον πυρήνα του οποίου βρίσκεται ένα σύστημα θέρμανσης ραδιενεργού ισότοπου που χρησιμοποιεί πλουτόνιο ως πηγή θερμότητας. Το εξατμιζόμενο νερό οδηγείται, έπειτα, σε ένα στάδιο καταλυτικής οξείδωσης στους 920K, μετά το οποίο συμπυκνώνεται και περνάει ένα τελευταίο στάδιο μετεπεξεργασίας. Το στερεό υπόλειμμα οδηγείται σε έναν καυστήρα, όπου αποτεφρώνεται στους 920K. Η τεχνολογία αυτή, χάρη στην υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της, δεν επηρεάζεται από μικροοργανισμούς και σωματίδια. Τέλος, η δυνατότητά της να επεξεργάζεται αποτελεσματικά τόσο τα υγρά όσο και τα στερεά απόβλητα την καθιστά ικανή να αντικαταστήσει τα δύο ξεχωριστά υποσυστήματα διαχείρισης νερού και αποβλήτων με ένα ενοποιημένο υποσύστημα, γι' αυτό και κρίνεται σημαντική η ωρίμανσή της (Eckart, 1996)

| Υποσύστημα Διαχείρισης Αποβλήτων | Τεχνολογία | TRL | Τεχνολογία Ενεργή στον ISS; |
|----------------------------------|--|-----|-----------------------------|
| Στάδιο Επεξεργασίας Αποβλήτων | Υγρή οξείδωση σε υπερκρίσιμες συνθήκες | ≥ 3 | Χ |
| | Υγρή οξείδωση | ≥ 3 | Χ |
| | Καύση | 5 | Χ |
| | Ηλεκτροχημική οξείδωση | ≥ 3 | Χ |
| | Σύστημα ανάκτησης νερού από απόβλητα | ≥ 3 | Χ |

Πίνακας 2. 3: Φυσικοχημικές τεχνολογίες επεξεργασίας βιολογικών αποβλήτων στο υποσύστημα διαχείρισης αποβλήτων και εκτίμηση του TRL αυτών. Προσαρμογή από (Nathanson, et al., 2011) (Czurpalla, et al., 2004)

Στον **Πίνακα 2.3** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι προαναφερθείσες φυσικοχημικές τεχνολογίες που υπάγονται στο υποσύστημα διαχείρισης αποβλήτων και σχετίζονται με το απαραίτητο στάδιο της επεξεργασίας αποβλήτων που προηγείται της ανάκτησης πόρων, μαζί με

το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητάς τους (Technology Readiness Level, TRL). Οφείλουμε να παρατηρήσουμε πως καμία από αυτές τις τεχνολογίες δεν λειτουργεί αυτήν τη στιγμή εν πτήσει στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, αφού το σύστημα διαχείρισης αποβλήτων που χρησιμοποιείται εκεί δεν έχει μετατραπεί ακόμη σε κλειστού κύκλου.

Σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν, η χρήση αποκλειστικά φυσικοχημικών τεχνολογιών στα υποσυστήματα διαχείρισης νερού και ατμόσφαιρας δύναται να συνεισφέρει δραστικά σε ένα αρκετά ικανοποιητικό κλείσιμο των κύκλων του νερού και του οξυγόνου, πολλώ δε μάλλον αν συνυπολογιστεί και η περαιτέρω ανάκτηση νερού από τα στερεά μεταβολικά απόβλητα και το υπόλειμμα άλμης μέσω του υποσυστήματος διαχείρισης αποβλήτων. Εντούτοις, το κλείσιμο του τρίτου και τελευταίου κύκλου, αυτού της τροφής, είναι αδύνατον -στην παρούσα φάση- να κλείσει με φυσικοχημικό τρόπο, καθώς απαιτεί τόσο την ανάκτηση χρήσιμων πόρων -θρεπτικών συστατικών, άνθρακα και νερού- από τα βιολογικά απόβλητα όσο και τη σύνθεση αυτών σε βρώσιμο υλικό. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή τουλάχιστον ενός παραγωγικού βιολογικού οργανισμού στο σύστημα υποστήριξης ζωής, ο οποίος θα καλύπτει μέρος των διατροφικών αναγκών του καταναλωτή ανθρώπου. Η δυνατότητα κλεισίματος του κύκλου της τροφής με τη χρήση βιολογικών οργανισμών -αλλά και η πιθανή συνεισφορά των βιολογικών οργανισμών στο κλείσιμο και των υπόλοιπων κύκλων- θα διερευνηθεί εκτενώς, ευθύς αμέσως, στην **Ενότητα 2.3**.

2.3 Θεματική παρουσίαση βιολογικών τεχνολογιών υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε τις διάφορες φυσικοχημικές τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί, μεταξύ των οποίων και τις πιο ώριμες τεχνολογικά, χάρη στις οποίες έχει επιτευχθεί το κλείσιμο των κύκλων του οξυγόνου και του νερού στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό. Είδαμε, επίσης, τις φυσικοχημικές τεχνολογίες που αφορούν στο στάδιο της επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων, το οποίο είναι, βεβαίως, απαραίτητο πριν την ανάκτηση των χρήσιμων πόρων. Παρά ταύτα, όμως, οι προοπτικές σύνθεσης τροφής κατευθύνονται από τους ανακτημένους πόρους με χημικές μεθόδους είναι, για την ώρα, ισχνές. Αν και έχει γίνει σημαντική πρόοδος προς τη χημική σύνθεση μεμονωμένων θρεπτικών συστατικών, όπως για παράδειγμα υδατανθράκων και λιπιδίων, εντούτοις η τεχνολογική ωρίμανση αντίστοιχων τεχνολογιών για τη χημική σύνθεση ολόκληρων τροφών σημαντικής διατροφικής αξίας αναμένεται να καθυστερήσει αρκετά (Gitelson, et al., 2003).

Επόμενο είναι, λοιπόν, η παραγωγή τροφής για το κλείσιμο του κύκλου των θρεπτικών στοιχείων που περιέχονται στα μεταβολικά απόβλητα να χρειαστεί την εισαγωγή ενός -τουλάχιστον- ακόμη βιολογικού οργανισμού, εκτός από τον άνθρωπο, στο φυσικοχημικό σύστημα υποστήριξης ζωής. Με αυτόν τον τρόπο, το προτέρως αμιγώς φυσικοχημικό σύστημα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου μετατρέπεται, πλέον, σε υβριδικό. Καθώς, όμως, είναι προαπαιτούμενο ο άνθρωπος να είναι ο καταναλωτικός οργανισμός κορυφής αυτού του σχηματιζόμενου τεχνητού οικοσυστήματος, προκύπτει η ανάγκη για την επιλογή του κατάλληλου αυτοτροφικού οργανισμού που θα αποτελέσει την παραγωγική βάση. Αυτοί οι αυτοτροφικοί οργανισμοί μπορεί να είναι είτε φωτοσυνθετικοί -όπως τα ανώτερα φυτά ή τα μικροφύκη- είτε χημικοσυνθετικοί -κυρίως χημικοσυνθετικά βακτήρια-. Βεβαίως, εκτός από τους παραγωγικούς οργανισμούς, θα ήταν δυνατόν να εισαχθούν σε αυτό το τεχνητό οικοσύστημα και καταναλωτές πρώτης βαθμίδας -φυτοφάγα ζώα-, αλλά και αποικοδομητές, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο την πολυπλοκότητά του. Παρά τη αυξανόμενη πολυπλοκότητα, όμως, η δυνατότητα αξιοποίησης των βιολογικών οργανισμών στο ταυτόχρονο κλείσιμο των κύκλων του οξυγόνου, του νερού, των αποβλήτων και της τροφής καθιστά αυτήν την προοπτική αρκετά ελκυστική (Yamashita & Wheeler, 2014) (Eckart, 1996) (Skoog, 2013).

Όπως προαναφέρθηκε, οι άνθρωποι είναι καταναλωτές, δηλαδή ετεροτροφικοί χημικοσυνθετικοί οργανισμοί που οξειδώνουν τις οργανικές ενώσεις που προσλαμβάνουν από την τροφή τους. Ο μεταβολικός τους αντίποδας, λοιπόν, σε ένα βιολογικό σύστημα υποστήριξης ζωής θα ήταν ένας αυτοτροφικός οργανισμός που θα συνθέτει αυτές τις οργανικές ενώσεις από τα ανθρώπινα μεταβολικά απόβλητα. Από την άλλη, δευτερεύοντες ετεροτροφικοί οργανισμοί δεν είναι δυνατόν να χρησιμεύσουν ως μεταβολικοί αντίποδες του επίσης ετεροτροφικού ανθρώπου σε ένα σύστημα υποστήριξης ζωής, γι' αυτό και η αξιοποίησή τους αφορά κυρίως σε υποστηρικτικές λειτουργίες, όπως για παράδειγμα στην αποικοδόμηση και ανοργανοποίηση (*mineralization*) των διαφόρων παραγόμενων οργανικών ενώσεων. Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι κεντρικές ιδέες για την αξιοποίηση βιολογικών οργανισμών στα συστήματα υποστήριξης ζωής, οι οποίες εντάσσονται στους εξής δύο θεματικούς άξονες: στους αυτοτροφικούς οργανισμούς και στους ετεροτροφικούς οργανισμούς (Gitelson, et al., 2003).

Αυτοτροφικοί οργανισμοί: Ο ρόλος των αυτοτροφικών οργανισμών σε ένα σύστημα υποστήριξης ζωής είναι η σύνθεση οργανικών ενώσεων από το ανόργανο CO₂, με σκοπό την κατανάλωσή τους από τον άνθρωπο ή από κάποιον δευτερεύοντα ετεροτροφικό οργανισμό. Οι οργανισμοί αυτοί διακρίνονται σε φωτοσυνθετικούς και χημικοσυνθετικούς. Οι αυτοτροφικοί χημικοσυνθετικοί οργανισμοί αντλούν την ενέργειά τους μέσω της οξειδωσης οργανικών ή ανόργανων ενώσεων, ενώ οι αυτοτροφικοί φωτοσυνθετικοί

οργανισμοί την αντλούν μέσω της διεργασίας της φωτοσύνθεσης (Jagow & Thomas, 1967).

Οι αυτοτροφικοί χημικοσυνθετικοί οργανισμοί είναι κατά βάση βακτήρια τα οποία έχουν την ικανότητα να οξειδώνουν τα διάφορα άλατα σιδήρου -σιδηροβακτήρια-, τις οργανικές ενώσεις του θείου -θειοβακτήρια-, τις οργανικές ενώσεις του αζώτου -νιτροβακτήρια- και το υδρογόνο -υδρογονοβακτήρια-, προκειμένου να αντλήσουν την απαραίτητη ενέργεια για τον μεταβολισμό τους. Πιο συγκεκριμένα, τα υδρογονοβακτήρια, τα οποία έχουν μελετηθεί εκτενέστερα για ενσωμάτωση στα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής, δύνανται να συνθέσουν τη βιομάζα τους αξιοποιώντας ως πρώτες ύλες H_2 , O_2 και CO_2 , χάρη στο ένζυμο υδρογονάση που εμπεριέχουν. Αν και πρώιμα πειράματα έδειξαν πως ήταν δυνατόν να αξιοποιηθεί η βακτηριακή βιομάζα των υδρογονοβακτηρίων ως τροφή για ανώτερα ζώα, εντούτοις η καταλληλότητά της για κατανάλωση από τον άνθρωπο δεν επιβεβαιώθηκε πειραματικά. Επί της αρχής, όλοι οι προαναφερθέντες οργανισμοί φαίνονται πολλά υποσχόμενοι τόσο εξαιτίας της ενεργειακής αποδοτικότητάς τους, καθώς η καλλιέργειά τους απαιτεί την απευθείας χρήση ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να χρειάζεται η μετατροπή της σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όσο και εξαιτίας της δυνατότητας αξιοποίησης αρκετών ανθρώπινων μεταβολικών αποβλήτων από αυτούς. Επίσης, η ικανότητά τους να μεταβολίζουν το άζωτο, το θείο και το υδρογόνο υποδεικνύει μια πιθανή συνέργειά τους με τα φυσικοχημικά συστήματα στη σύνδεση και το κλείσιμο των κύκλων του νερού, της ατμόσφαιρας και της τροφής, μέσω της κατάλληλης διαχείρισης των αποβλήτων. Βεβαίως, απαραίτητο βήμα προς τον έλεγχο αυτής της υπόθεσης αποτελεί η μελλοντική εξακρίβωση της διατροφικής αξίας της παραγόμενης βακτηριακής βιομάζας τους για τον άνθρωπο καταναλωτή (Jagow & Thomas, 1967) (Gitelson, et al., 2003) (Eckart, 1996).

Οι αυτοτροφικοί φωτοσυνθετικοί οργανισμοί είναι κυρίως μικροφύκη (microalgae) και ανώτερα φυτά που, μέσω της διεργασίας της φωτοσύνθεσης, μετατρέπουν το H_2O και το CO_2 σε O_2 και βιομάζα (Gitelson, et al., 2003).

Η μεγάλη βιοποικιλότητα που παρουσιάζουν τα μικροφύκη, η βιοχημική τους σύσταση, ο ταχύς πολλαπλασιασμός τους και η δυνατότητά τους να αξιοποιούν τα νιτρικά άλατα, την ουρία και την αμμωνία των ανθρώπινων μεταβολικών αποβλήτων τα καθιστούν αρκετά ελπιδοφόρα για ενσωμάτωση στα συστήματα υποστήριξης ζωής. Πιο συγκεκριμένα, τα διάφορα είδη μονοκύτταρων πράσινων μικροαλγών -κυρίως τα γένη *Scenedesmus*, *Chlamidomonas* και *Chlorella*- και κυανοβακτηρίων -κυρίως τα γένη *Anacystis* και *Spirulina*- θεωρούνται οι καταλληλότεροι υποψήφιοι, χάρη στην ευρεία οικολογική τους πλαστικότητα, την απλή και άφυλη αναπαραγωγή τους και την ευκολία της καλλιέργειάς τους. Ειδικότερα, μάλιστα, τα είδη και τα στελέχη του γένους *Chlorella* φαίνεται να

συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο πλήθος θετικών χαρακτηριστικών από κάθε άλλο γένος μικροφυκών αναφορικά με τη χρήση τους στο κλείσιμο των κύκλων του νερού και της ατμόσφαιρας. Ως προς τον κύκλο της τροφής, όμως, η επιλογή του κατάλληλου γένους μικροφυκών περιπλέκεται. Μολονότι μια ημερήσια συγκομιδή βιομάζας 0.4-0.5kg του είδους *Chlorella vulgaris* μπορεί, παράλληλα με την κάλυψη της ημερήσιας ανάγκης ενός ανθρώπου σε οξυγόνο και την απομάκρυνση του CO₂, να παρέχει μεγάλες ποσότητες από όλα τα απαραίτητα για τον άνθρωπο αμινοξέα, ένας πλήρης συμπλήρωμα βιταμινών, μία ικανοποιητική ποσότητα λιπιδίων και μικρή ποσότητα τέφρας, η παρεχόμενη ποσότητα υδατανθράκων δεν κρίνεται ικανοποιητική για την κάλυψη των ανθρωπίνων αναγκών. Πρώιμα πειράματα για την αξιοποίηση μεγάλων ποσοτήτων αυτής της ανεπεξέργαστης βιομάζας στη διατροφή ζώων και ανθρώπων έδειξαν χαμηλή πεπτικότητα και σημαντικές αρνητικές παρενέργειες. Μετέπειτα πειράματα εκχύλισης των εμπεριεχομένων πρωτεϊνών από αυτή τη βιομάζα έδειξαν πως οι πρωτεΐνες αυτές απέδωσαν πλήρη θρεπτική αξία όταν χρησιμοποιήθηκαν ως τροφή σε αρουραίους. Έτσι, για την κάλυψη των θρεπτικών απαιτήσεων έχει προταθεί και η αξιοποίηση στελεχών κυανοβακτηρίων υψηλής διατροφικής αξίας -*Spirulina*-, αν και η αποδοτικότητά τους ως μοναδική πηγή τροφής σε μεγάλες ποσότητες δεν έχει εξακριβωθεί ακόμη πειραματικά. Εν κατακλείδι, εξαιτίας της βιοχημικής σύστασης των θρεπτικών συστατικών που παράγουν στη βιομάζα τους, τα διάφορα είδη βρώσιμων μικροφυκών δεν φαίνεται να μπορούν, για την ώρα, να καλύψουν με αποκλειστικότητα τον ρόλο του κύριου μέρους της ανθρωπίνης διατροφής, αλλά μάλλον τον ρόλο του διατροφικού συμπληρώματος (Gitelson, et al., 2003) (Skoog, 2013) (Eckart, 1996).

Τα ανώτερα φυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο εξαιτίας της διατροφικής αξίας τους όσο και εξαιτίας της ευεργετικής ψυχολογικής τους επίδρασης στη διάθεση των αστροναυτών. Όπως και τα μικροφύκη, τα ανώτερα φυτά δύνανται να συνεισφέρουν στο κλείσιμο των κύκλων του νερού -χάρη στη διαπνοή τους-, της ατμόσφαιρας και της τροφής -χάρη στη φωτοσύνθεση-, μέσω της αξιοποίησης των ανθρωπίνων αέριων και υγρών μεταβολικών αποβλήτων και της ανοργανοποίησης των στερεών αποβλήτων. Καθώς, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, οι προοπτικές αξιοποίησης μικροφυκών στη βιολογική σύνθεση τροφής πλήρους διατροφικής αξίας για τους αστροναύτες είναι ισχνές, έπεται ότι τα ανώτερα φυτά αποτελούν τους πλέον πιθανούς υποψήφιους οργανισμούς για την υλοποίηση αυτού του στόχου, παράλληλα με την εξυγίανση της ατμόσφαιρας και του νερού. Για την επιλογή των καταλληλότερων φυτών έχουν προταθεί αρκετά κριτήρια, τα βασικότερα των οποίων είναι τα παρακάτω: υψηλή παραγωγικότητα αυτοεπικονίαση ή απόμιξη ικανότητα κάλυψης των ανθρωπίνων διατροφικών αναγκών σε μάζα και βιοχημική σύσταση βιολογική συμβατότητα με τον άνθρωπο απουσία αερίων προϊόντων που μπορούν να βλάψουν τον άνθρωπο ανθρωπίνως αποδεκτές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας που απαιτούνται για την καλλιέργειά τους ευκολία στη

συγκομιδή της βιομάζας· ευκολία στην παρασκευή γευμάτων· και ποικιλία γευμάτων που μπορούν να παρασκευαστούν με βάση αυτήν τη βιομάζα. Έτσι, τα φυτά που έχουν θεωρηθεί οι καταλληλότεροι υποψήφιοι για αυτόν τον ρόλο είναι κυρίως η σόγια, τα φιστίκια και οι κόνδυλοι κύπερης -κυρίως λόγω της θερμιδικής και διατροφικής αξίας τους, καθώς περιέχουν λιπίδια, πρωτεΐνες και υδατάνθρακες-, αλλά και το σιτάρι, το ρύζι, οι πατάτες, οι φράουλες, το μαρούλι, το κοματσούνα και το μπρόκολο -κυρίως λόγω της περιεκτικότητάς τους σε βιταμίνες, αλλά και της υψηλής ψυχολογικής τους αξίας-. Εντούτοις, η κάλυψη όλων των ανθρωπίνων αναγκών φαίνεται πως δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί από ένα και μόνο φυτικό είδος, παρά μόνον από έναν κατάλληλο συνδυασμό διαφορετικών ειδών. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί πως, εξαιτίας των συνθηκών υψηλών επιπέδων ακτινοβολίας και μικροβαρύτητας, αλλά και του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου και ηλιακού φωτός εντός ενός διαστημικού σταθμού, έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένες τεχνολογίες καλλιέργειας που συνδυάζουν στοιχεία υδροπονίας και τεχνητού φωτισμού για την πλήρως ελεγχόμενη ανάπτυξη των φυτών μέσα σε κλειστούς θαλάμους· αναφέρουμε επί παραδείγματι τη μηχανή σαλάτας (salad machine) της NASA (Gitelson, et al., 2003) (Skoog, 2013) (Eckart, 1996) (Yamashita & Wheeler, 2014).

Ετεροτροφικοί οργανισμοί: Όπως προαναφέρθηκε, σε ένα σύστημα υποστήριξης ζωής ο άνθρωπος είναι ο κύριος ετεροτροφικός οργανισμός· όλοι οι υπόλοιποι οργανισμοί του σχηματιζόμενου τεχνητού οικοσυστήματος οφείλουν να παρέχουν στον άνθρωπο είτε τροφή με τη μορφή οργανικών ενώσεων είτε υποστηρικτικές υπηρεσίες. Εξαιτίας της αδυναμίας των αυτοτροφικών οργανισμών να αφομοιώσουν πλήρως όλα τα αέρια, υγρά και στερεά μεταβολικά απόβλητα του ανθρώπου και να του παρέχουν, παράλληλα, βρώσιμη βιομάζα, φαίνεται πως θα ήταν, πρωτίστως, αναγκαία η εισαγωγή ετεροτροφικών αποικοδομητών στο τεχνητό οικοσύστημα. Οι αποικοδομητές θα μπορούσαν να αποδομήσουν και να ανοργανοποιήσουν την περίσσεια βιομάζας και τα μεταβολικά απόβλητα, συνεισφέροντας στο κλείσιμο του κύκλου της τροφής μέσω της ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων και της επιστροφής τους στις καλλιέργειες των αυτοτροφικών οργανισμών. Οι οργανισμοί αυτοί θα μπορούσαν να είναι αερόβια και αναερόβια βακτήρια, ανώτεροι μύκητες -κυρίως τα είδη του γένους *Pleurotus*, τα οποία έχουν και το πλεονέκτημα της βρωσιμότητας- και γαιοσκώληκες, αναλόγως του απαιτούμενου επιπέδου αποδόμησης. Κατά δεύτερον, πέραν των αποικοδομητών, άλλοι ετεροτροφικοί καταναλωτικοί οργανισμοί, δηλαδή βρώσιμα χορτοφάγα ζώα, θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στη βιολογική σύνθεση θρεπτικών συστατικών υψηλής διατροφικής αξίας για τον άνθρωπο, όπως για παράδειγμα ζωικά λιπίδια και πρωτεΐνες, τα οποία αδυνατούν να συνθέσουν οι αυτοτροφικοί οργανισμοί. Βεβαίως, η εισαγωγή ενός ακόμη κρίκου στην τροφική αλυσίδα αυτού του τεχνητού οικοσυστήματος θα το καθιστούσε ακόμη πιο περίπλοκο, καθώς θα ανέκυπτε η ανάγκη παροχής ισορροπημένης τροφής στα ζώα, φιλοξενίας τους

στον περιορισμένο χώρο του διαστημικού σταθμού και διαχείρισης των αποβλήτων τους. Για τους λόγους αυτούς, οι ερευνητές έχουν καταλήξει, ως πρώτη προσέγγιση, στους εξής υποψήφιους χορτοφάγους οργανισμούς, οι οποίοι έχουν μικρό όγκο και βραχύ κύκλο ζωής: ψάρια σε υδατοκαλλιέργειες -π.χ. τα διάφορα είδη της φυλής *Tilapiini* ή το είδος *Misgurnus anguillicaudatus*-, σαλιγκάρια, ακρίδες, μεταξοσκώληκες, μικρά μαλάκια και οστρακόδερμα, αλλά και διάφορα πρωτόζωα και κατώτεροι μύκητες. Αξίζει να σημειωθεί πως τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας που συνδυάζουν την καλλιέργεια ψαριών -π.χ. *Misgurnus anguillicaudatus*- και ανώτερων φυτών -π.χ. ρυζιού- θεωρούνται αρκετά ανταγωνιστικά ως υποψήφιοι για ένταξη σε ένα σύστημα υποστήριξης ζωής (Gitelson, et al., 2003) (Skoog, 2013) (Eckart, 1996) (Yamashita & Wheeler, 2014).

Κλείνοντας τα όσα προαναφέρθηκαν, οφείλουμε να αναφέρουμε πως έχει ήδη αναπτυχθεί μια πρότυπη διαίτα που θα μπορούσε να καλύψει σε μεγάλο βαθμό τις ημερήσιες διατροφικές ανάγκες ενός ανθρώπου, συνδυάζοντας ρύζι -300g-, σόγια -100g-, γλυκοπατάτα -200g-, κοματσούνα -300g-, μεταξοσκώληκες -50g-, *Misgurnus anguillicaudatus* από συγκαλλιέργεια με ρύζι -120g- και αλάτι -3g-. Αυτές οι ημερήσιες συνιστώμενες παροχές παρουσιάζονται εποπτικά και στο **Σχήμα 2.5** (Yamashita & Wheeler, 2014).



Σχήμα 2. 5: Πρότυπη διαίτα για τη μέγιστη κάλυψη των ημερήσιων αναγκών ενός αστροναύτη. Προσαρμογή από (Yamashita & Wheeler, 2014)

Παράλληλα με τη δυνατότητα κλείσιματος του κύκλου της τροφής με τη χρήση βιολογικών οργανισμών, όμως, είναι εφικτή η συνεισφορά των βιολογικών οργανισμών στο κλείσιμο και των υπόλοιπων κύκλων (Eckart, 1996).

Ως προς το κλείσιμο του κύκλου της ατμόσφαιρας, τόσο η απομάκρυνση του CO₂ όσο και η παραγωγή του O₂ είναι άμεσα αποτελέσματα της διεργασίας της φωτοσύνθεσης των φωτοσυνθετικών αυτοτροφικών οργανισμών. Η σχετική τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί είναι το φωτοβιοαντιδραστικό σύστημα αναζωογόνησης αέρα (photobioreactor air revitalization system), το οποίο αποτελείται από δύο υποσυστήματα: έναν φωτοβιοαντιδραστήρα εντός του οποίου καλλιεργείται το μικροφύκος *Spirulina platensis* και μια μονάδα επεξεργασίας βιομάζας. Εντός του φωτοβιοαντιδραστήρα τα μικροφύκη καταναλώνουν θρεπτικά στοιχεία, CO₂ και νερό, παράγοντας, μέσω της φωτοσύνθεσης, βιομάζα, O₂ και θερμότητα. Εντός τη ομάδας επεξεργασίας βιομάζας συλλέγεται, αφυδατώνεται και προετοιμάζεται για βρώση η περίσσεια βιομάζας των μικροφυκών αυτών (Nathanson, et al., 2011)

Ως προς το κλείσιμο του κύκλου του νερού, τα φυτά μπορούν να λειτουργήσουν ως φυσικά συστήματα καθαρισμού, καθώς αντλούν το νερό από τις ρίζες τους και διαπνέουν ένα μέρος του από τα φύλλα τους με τη μορφή υδρατμών. Ακόμη, τα αυτοτροφικά χημικοσυνθετικά νιτροβακτήρια μπορούν να αξιοποιηθούν στη νιτροποίηση της αμμωνίας που εμπεριέχεται στα ούρα. Η σχετική τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί και αξιοποιεί, μεταξύ άλλων, και αυτό το είδος βακτηρίων είναι ο βιοαντιδραστήρας ακινητοποιημένων κυττάρων με βιοαντιδραστήρα φίλτρου διύλισης (immobilized cell bioreactor with trickling filter bioreactor), ο οποίος αποτελείται από τα εξής τέσσερα στάδια. Στο πρώτο στάδιο τα λύματα εισέρχονται, μαζί με ατμοσφαιρικό αέρα, σε έναν δεύτερο βιοαντιδραστήρα που εμπεριέχει πορώδεις πολυμερείς μεμβράνες οι οποίες κατοικούνται από βιοϋμένια μικροβίων (microbial biofilms). Σε αυτό το στάδιο οι οργανικοί ρύποι απομακρύνονται από τα λύματα, χάρη σε αυτές τις μικροβιακές κοινότητες. Στο δεύτερο στάδιο τα λύματα εισέρχονται, και πάλι μαζί με ατμοσφαιρικό αέρα, σε ένα σύστημα διύλισης που εμπεριέχει μικροβιακές κοινότητες και συσσωματώματα δολομίτη. Σε αυτό το στάδιο επιτυγχάνεται η νιτροποίηση της αμμωνίας και παράλληλα συντελείται ένας εμπλουτισμός των λυμάτων με διττανθρακικά άλατα. Στο τρίτο στάδιο το προεπεξεργασμένο νερό διασχίζει μία διάταξη αντίστροφης όσμωσης, από την οποία το 80% αυτού εξέρχεται φιλτραρισμένο μέσω της σχετικής ημιδιαπερατής μεμβράνης, ενώ το υπόλοιπο 20% εξέρχεται ως αραιή άλμη. Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο το επεξεργασμένο νερό διασχίζει μία διάταξη στρωμάτων ιοντοεναλλαγής, προκειμένου να παρακρατηθούν πιθανά κατάλοιπα οργανικών ή ανόργανων ρύπων. Οι δευτερεύουσες εκροές του όλου συστήματος είναι, βεβαίως, η άλμη, το CO₂ και ιχνοποσότητες αερίων ρύπων

που παράγονται από τα μικροβιακά βιοϋμένια, ενώ η κύρια εκροή του είναι πόσιμο νερό. Αξίζει να αναφερθεί πως με βάση το προαναφερθέν σύστημα έχει ξεκινήσει να αναπτύσσεται και μια δεύτερη τεχνολογία, ο βιοαντιδραστήρας συνδυασμένων στρωμάτων για βιολογική νιτροποίηση λυμάτων (*packed bed bioreactor for biological waste water nitrification*), η οποία στοχεύει να συνενώσει σε έναν τους δύο ξεχωριστούς βιοαντιδραστήρες (Nathanson, et al., 2011).

Ως προς την ανάκτηση πόρων από τα στερεά και ημίρρευστα απόβλητα για το κλείσιμο του κύκλου της τροφής, βιοαντιδραστήρες αερόβιων ή αναερόβιων μικροοργανισμών μπορούν να απελευθερώσουν θρεπτικά άλατα και CO₂ για κατανάλωση από τους αυτοτροφικούς οργανισμούς. Η σχετική τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί είναι ο αερόβιος βιοαντιδραστήρας ιλύος (*aerobic slurry bioreactor*). Η διάταξη αυτή εμπεριέχει ένα αραιό διάλυμα στερεών αποβλήτων, βακτηρίων, μυκήτων και πρωτόζωων. Οι μικροοργανισμοί αυτοί μπορούν να βιοαποδομήσουν ένα μεγάλο εύρος οργανικών ενώσεων σε CO₂ και νερό, καταναλώνοντας παράλληλα O₂ από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η αποδοτικότητα της αποδόμησης εξαρτάται από τη διάρκεια της κατακράτησης των αποβλήτων, η οποία μπορεί να είναι οκτώ, είκοσι τέσσερις ή σαράντα οκτώ ημέρες. Κατά το στάδιο της μετεπεξεργασίας η ιλύς φιλτράρεται, και το νερό της αποδίδεται στο σύστημα διαχείρισης νερού για μετέπειτα επεξεργασία, ενώ τα στερεά της μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως θρεπτικά συστατικά στην καλλιέργεια αυτοτροφικών οργανισμών (Nathanson, et al., 2011).

Τέλος, αναφορικά με το υποσύστημα διαχείρισης τροφής, χρήζει ιδιαίτερης αναφοράς η μηχανή σαλάτας (*salad machine*) της NASA. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν κλειστό θάλαμο καλλιέργειας ανώτερων φυτών, σε αυστηρώς ελεγχόμενες συνθήκες τεχνητού φωτισμού και υδροπονίας, εντός του οποίου συντελείται όλος ο κύκλος ζωής των φυτών από τη βλάστηση έως τη συγκομιδή (Eckart, 1996) (Nathanson, et al., 2011).

Στον **Πίνακα 2.4** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι προαναφερθείσες βιολογικές τεχνολογίες που υπάγονται στα υποσυστήματα, διαχείρισης ατμόσφαιρας, νερού, αποβλήτων και τροφής, μαζί με το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητάς τους (*Technology Readiness Level, TRL*). Οφείλουμε να παρατηρήσουμε πως καμία από αυτές τις τεχνολογίες δεν λειτουργεί αυτήν τη στιγμή εν πτήσει στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό.

| Σχετικό Υποσύστημα | Τεχνολογία | TRL | Τεχνολογία Ενεργή στον ISS; |
|-------------------------|--|-----|-----------------------------|
| Διαχείρισης Ατμόσφαιρας | Φωτοβιοαντιδραστικό σύστημα αναζωογόνησης αέρα | 5 | X |
| Διαχείρισης Νερού | Βιοαντιδραστήρας ακινητοποιημένων κυττάρων με Βιοαντιδραστήρα φίλτρου διύλισης | 5 | X |
| | Βιοαντιδραστήρας συνδυασμένων στρωμάτων για βιολογική νιτροποίηση λυμάτων | 3 | X |
| Διαχείρισης Αποβλήτων | Αερόβιος βιοαντιδραστήρας ιλύος | 3 | X |
| Διαχείρισης Τροφής | Μηχανή σαλάτας | 6 | X |

Πίνακας 2. 4: Βιολογικές τεχνολογίες για τα διάφορα υποσυστήματα υποστήριξης ζωής και εκτίμηση του TRL αυτών. Προσαρμογή από (Nathanson, et al., 2011)

Σε αυτήν την ενότητα παρατέθηκαν οι βασικές ιδέες και οι πρώιμες τεχνολογίες για την αξιοποίηση βιολογικών οργανισμών στο κλείσιμο των κύκλων του νερού, της ατμόσφαιρας και της τροφής, μέσω της κατάλληλης διαχείρισης των αποβλήτων, εντός ενός διαστημικού συστήματος υποστήριξης ζωής. Στο **Κεφάλαιο 3** θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα παραδείγματα πιλοτικών πειραματικών εγκαταστάσεων στη Γη, μέσα στις οποίες αναπτύσσονται και εξελίσσονται αυτές οι τεχνολογίες ως υποσυστήματα τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων. Καθώς, όπως είναι λογικό, οι βιολογικές τεχνολογίες εμφανίζουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων φυσικοχημικών, θα ήταν χρήσιμη μια συγκριτική επισκόπηση αυτών των δύο ευρύτερων τεχνολογικών οικογενειών, προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η ανάγκη του υβριδισμού τους· μια ανάγκη η οποία συζητήθηκε στην **Ενότητα 2.1**. Αυτή η συγκριτική επισκόπηση θα διεξαχθεί συνοπτικά ευθύς αμέσως στην **Ενότητα 2.4**.

2.4 Συγκριτική επισκόπηση των φυσικοχημικών και των βιολογικών τεχνολογιών

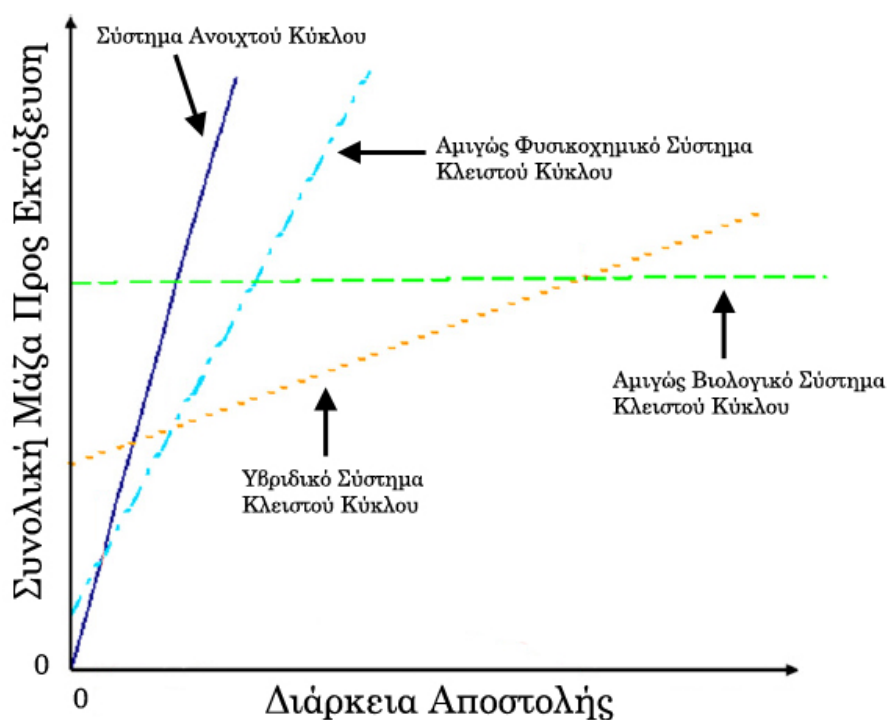
Στις προηγούμενες ενότητες γνωρίσαμε τις διάφορες φυσικοχημικές και βιολογικές τεχνολογίες που μπορούν να πραγματοποιήσουν την ανακύκλωση των βασικών μεταβολικών πόρων του οξυγόνου, του νερού και της τροφής σε ένα σύστημα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας των αερίων, υγρών και στερεών αποβλήτων. Θεωρητικά, είναι εφικτός ο σχεδιασμός ενός συστήματος υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου τόσο με αμιγώς φυσικοχημικές τεχνολογίες όσο και με αμιγώς βιολογικές. Εντούτοις, και οι δύο οικογένειες τεχνολογιών εμφανίζουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Για τον λόγο αυτό, συνίσταται η προσεκτική επιλογή τόσο φυσικοχημικών όσο και βιολογικών τεχνολογιών, έτσι ώστε τα πλεονεκτήματα των μεν να αντισταθμίζουν τα μειονεκτήματα των δε. Ο συνδυασμός των κατάλληλων τεχνολογιών από αυτές τις δύο οικογένειες μπορεί να οδηγήσει στον σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, τα οποία θα εμφανίζουν σαφώς βελτιωμένα χαρακτηριστικά από τα αμιγώς φυσικοχημικά ή τα αμιγώς βιολογικά (Schwartzkopf, 1997).

Πιο συγκεκριμένα, οι φυσικοχημικές τεχνολογίες έχουν υψηλότερα επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητας (Technology Readiness Level, TRL), έχουν -στην πλειονότητά τους- ήδη λειτουργικές εφαρμογές στη Γη, είναι σχετικά απλές, και οι επιστήμονες και οι μηχανικοί τις κατανοούν αρκετά καλά και τις εμπιστεύονται περισσότερο. Επίσης, αυτές οι τεχνολογίες τείνουν να διεκπεραιώνουν γρήγορα τις σχετικές διεργασίες τους, καταλαμβάνουν μικρό όγκο και δεν χρειάζονται συχνή συντήρηση. Από την άλλη, οι τεχνολογίες αυτές τείνουν να απαιτούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ισχύος, είναι εξειδικευμένες στο να εκτελούν μία συγκεκριμένη λειτουργία και, ενώ μπορούν να συνεισφέρουν στο κλείσιμο του κύκλου της ατμόσφαιρας και του νερού, αδυνατούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά το πρόβλημα της ανάκτησης πόρων από τα απόβλητα για την παραγωγή τροφής στο διάστημα -και άρα αδυνατούν να κλείσουν τον σχετικό κύκλο- (Eckart, 1996) (Clément, 2011) (Schwartzkopf, 1997) (Skoog, 2013).

Από την άλλη, οι βιολογικές τεχνολογίες έχουν χαμηλά επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητας (Technology Readiness Level, TRL), ενέχουν υψηλό βαθμό περιπλοκότητας τόσο ως προς τη λειτουργία όσο και ως προς τον έλεγχό τους, και οι επιστήμονες και οι μηχανικοί δεν τις κατανοούν επαρκώς. Επιπλέον, οι τεχνολογίες αυτές τείνουν να διεκπεραιώνουν αργά τις σχετικές διεργασίες τους, καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο και χρειάζονται συχνότερη συντήρηση. Εντούτοις, αυτές οι τεχνολογίες απαιτούν μικρές ποσότητες ηλεκτρικής ισχύος, είναι πολυλειτουργικές, καθώς εμπλέκονται και στους τρεις κύκλους, και είναι, για την ώρα, οι μόνες που μπορούν να κλείσουν τον

κύκλο της τροφής μέσω της ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων από τα απόβλητα. Ακόμη, στην περίπτωση των τεχνολογιών που συμπεριλαμβάνουν ανώτερα φυτά, αξιοσημείωτη είναι και η θετική ψυχολογική τους επίδραση στη διάθεση των αστροναυτών (Eckart, 1996) (Clément, 2011) (Schwartzkopf, 1997) (Skoog, 2013).

Οι παραπάνω λόγοι έχουν, μάλιστα, οδηγήσει τη NASA στην στρατηγική επιλογή της συστηματικής διερεύνησης του συνδυασμού των κατάλληλων φυσικοχημικών και βιολογικών τεχνολογιών για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων υποστήριξης ζωής, τα οποία θα καταστήσουν εφικτή την επανδρωμένη εξερεύνηση του πλανήτη Άρη το 2035 (Shaw & de Weck, 2014).



Σχήμα 2. 6: Σχετική επίδοση αμιγώς φυσικοχημικών, αμιγώς βιολογικών και υβριδικών συστημάτων υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, σε σχέση με τη διάρκεια μιας διαστημικής αποστολής αναφοράς. Προσαρμογή από (Belz, et al., 2013)

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, στο **Σχήμα 2.6** παρατίθεται ποιοτικά η σχετική επίδοση των αμιγώς φυσικοχημικών, αμιγώς βιολογικών και υβριδικών συστημάτων υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, αλλά και η επίδοση ενός συστήματος ανοιχτού κύκλου, συναρτήσει της διάρκειας μιας διαστημικής αποστολής αναφοράς. Αυτή η επίδοση απεικονίζεται με την απαιτούμενη μάζα προς εκτόξευση για το εκάστοτε σύστημα, η οποία είναι και ο καθοριστικός παράγοντας του κόστους κάθε διαστημικής αποστολής. Τα σημεία τομής αυτών των τεσσάρων γραφικών παραστάσεων αποτελούν τα σημεία εξισορρόπησης του κόστους μάζας του ζεύγους των τεχνολογιών που

απεικονίζονται στις τεμνόμενες καμπύλες για δεδομένη διάρκεια αποστολής. Αυτά τα σημεία υποδεικνύουν την ελάχιστη διάρκεια της διαστημικής αποστολής που απαιτείται, έτσι ώστε να είναι ο ένας τύπος συστήματος υποστήριξης ζωής καταλληλότερος από τον άλλον, από τη σκοπιά του κόστους της μάζας προς εκτόξευση. Σύμφωνα με τις δύο πιο πρόσφατες εκτιμήσεις, τα αμιγώς βιολογικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου γίνονται τα πιο ανταγωνιστικά μόνο για αποστολές αρκετά μεγάλης διάρκειας, δηλαδή 30 ή 80 ετών. Τα υβριδικά συστήματα κλειστού κύκλου, από την άλλη, γίνονται πιο ανταγωνιστικά από τα αμιγώς φυσικοχημικά συστήματα κλειστού κύκλου και τα συστήματα ανοιχτού κύκλου για αποστολές μέσης διάρκειας, δηλαδή 6 ή 29 ετών. Τέλος, τα αμιγώς φυσικοχημικά συστήματα κλειστού κύκλου γίνονται πιο ανταγωνιστικά από τα συστήματα ανοιχτού κύκλου για αποστολές μικρότερης διάρκειας, δηλαδή 131 ή 256 ημερών (Belz, et al., 2013).

Τα προλεχθέντα συνηγορούν στην ανάγκη σχεδιασμού και ανάπτυξης υβριδικών συστημάτων υποστήριξης ζωής, τα οποία μπορούν τόσο να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες της επανδρωμένης πλανητικής εξερεύνησης στο προσεχές μέλλον όσο και να χρησιμεύσουν ως ενδιάμεσος σταθμός προς την κατασκευή αμιγώς βιολογικών συστημάτων υποστήριξης ζωής, δηλαδή τεχνητών οικοσυστημάτων και βιοσφαιρών στο διάστημα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι πειραματικές επίγειες εγκαταστάσεις τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων που λειτουργούν στην Ευρώπη, στις ΗΠΑ, στη Ρωσία, την Ιαπωνία και την Κίνα, καθώς ο κύριος στρατηγικός τους στόχος είναι η δοκιμή και η ωρίμανση των τεχνολογιών για τη δημιουργία τεχνητών οικοσυστημάτων υποστήριξης ζωής στο διάστημα.

2.5 Βιβλιογραφία

Barta, D. J. & Henninger, D. L., 1994. Regenerative Life Support Systems - Why do we need them?. *Adv. Space Res.*, Volume 14, pp. 403-410.

Belz, S. et al., 2013. Hybrid life support systems with integrated fuel cells and photobioreactors for a lunar base. *Aerospace Science and Technology*, Volume 24, pp. 169-176.

Clément, G., 2011. Life Support Systems. In: *Fundamentals of Space Medicine*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+Business Media, pp. 305-340.

Czupalla, M., Aponte, V., Chappell, S. & Klaus, D., 2004. Analysis of a spacecraft life support system for a Mars mission. *Acta Astronautica*, Volume 55, pp. 537-547.

- Eckart, P., 1996. Bioregenerative Life Support Concepts. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 249-364.
- Eckart, P., 1996. Fundamentals of Life Support Systems. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 79-174.
- Eckart, P., 1996. Physico-chemical Life Support Subsystems. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 175-248.
- Ferrall, J., Ganapathi, G., Rohatgi, N. & Seshan, P., 1994. *Life support systems analysis and technical trades for a lunar outpost*, s.l.: NASA Technical Memorandum 109927.
- Gitelson, I. I., Lisovsky, G. M. & MacElroy, R. D., 2003. Manmade Closed Ecosystems and the Methodology of their Creation. In: *Manmade Closed Ecological Systems*. s.l.:Taylor & Francis, pp. 21-32.
- Gitelson, I. I., Lisovsky, G. M. & MacElroy, R. D., 2003. Possible Components of a Closed Human Life Support Ecosystem. In: *Manmade Closed Ecological Systems*. s.l.:Taylor & Francis, pp. 72-90.
- Jagow, R. B. & Thomas, R. S., 1967. Study of Life-Support Systems Exceeding One Year in Duration. In: *The Closed Life-Support System*. s.l.:NASA-Ames Research Center, NASA SP-134, pp. 75-144.
- Jones, H. & Kliss, M., 2010. *Developing an Advanced Life Support System for the Flexible Path into Deep Space*. Barcelona, Spain, 40th International Conference on Environmental Systems, 11-15 July 2010.
- Jones, H. W., Hodgson, E. W. & Kliss, M. H., 2014. *Life Support for Deep Space and Mars*. Tucson, Arizona, 44th International Conference on Environmental Systems, 13-17 July 2014.
- Mankins, J. C., 2009. Technology readiness assessments: A retrospective. *Acta Astronautica*, Volume 65, pp. 1216-1223.
- Nathanson, E., Zimmer, A. & Messerschmid, E., 2011. *Environmental Control and Life Support Systems for Human Exploration Missions to Near Earth Objects and beyond*. Kapstadt, Südafrika, 62nd International Astronautical Congress, IAC-11.A1.6.6.
- Schwartzkopf, S. H., 1997. Human Life Support for Advanced Space Exploration. *Advances in Space Biology and Medicine*, Volume 6, pp. 231-253.
- Shaw, M. M. & de Weck, O. L., 2014. *An Analysis of Hybrid Life Support Systems For Sustainable Habitats*. Tucson, Arizona, 44th International Conference on Environmental Systems 13-17 July 2014.
- Skoog, A. I., 2013. Life support systems. In: C. Norberg, ed. *Human Spaceflight and Exploration*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 161-207.
- Wieland, P., 1994. *Designing for Human Presence in Space: an introduction to Environmental Control and Life Support Systems, NASA Reference Publication 1324*. s.l.:NASA.

Yamashita, M. & Wheeler, R. M., 2014. Habitation in Space. In: M. Macdonald & V. Badescu, eds. *The International Handbook of Space Technology*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 493-514.

Κεφάλαιο 3: Τεχνητά Κλειστά Οικοσυστήματα στη Γη

3.1 Βιόσφαιρα, Ανθρωπόκαινος Εποχή και Τεχνητά Κλειστά Οικοσυστήματα

Η γήινη βιόσφαιρα είναι ένα παγκόσμιο δυναμικό σύστημα κλειστό ως προς την ύλη και ανοιχτό ως προς την ενέργεια. Η βιόσφαιρα βρίσκεται στην κορυφή της οικολογικής ιεραρχίας και περιλαμβάνει όλα τα γήινα οικοσυστήματα, τόσο τα έμβια όσο και τα αβιοτικά μέρη τους. Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της, τα οποία εξασφαλίζουν τη διατήρηση της ζωής στη Γη, είναι: η αρτιότητα, καθώς η βιόσφαιρα αναδύεται ως ένα ενιαίο σύστημα χάρη στις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις και ανταλλαγές ύλης στις οποίες εμπλέκονται όλοι οι έμβιοι οργανισμοί που εμπεριέχει το κλείσιμο, καθώς κάθε ανταλλαγή ύλης -και κυρίως του άνθρακα- συντελείται σχεδόν αποκλειστικά εντός των ορίων της βιόσφαιρας η κυκλικότητα, καθώς οι ανταλλαγές ύλης εντός της βιόσφαιρας μπορούν να επαναλαμβάνονται διαρκώς, και κάθε θρεπτικό στοιχείο να ανακυκλώνεται πλήρως ή σχεδόν πλήρως σε κάθε επανάληψη η σταθερή κατάσταση, καθώς οι ρυθμοί των διεργασιών ανακύκλωσης βρίσκονται σε αμοιβαία ισορροπία, έτσι ώστε οι ποσότητες της έμβιας βιομάζας και των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον να κυμαίνονται γύρω συγκεκριμένες σταθερές ποσότητες ισορροπίας καθ' όλη τη διάρκεια των μακροχρόνιων γεωλογικών εποχών και, τέλος, η ενεργειακή εξάρτηση, καθώς η βιόσφαιρα είναι ένα σύστημα που απέχει πολύ από τη θερμοδυναμική ισορροπία και άρα απαιτεί μια διαρκή εισροή ενέργειας -κατά βάση ηλιακής- προκειμένου να διατηρηθεί σε λειτουργία. Η γήινη βιόσφαιρα είναι, δηλαδή, ένα φυσικό σύστημα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου (Gitelson, et al., 2003) (Eckart, 1996).

Αυτή η σταθερή κατάσταση της βιόσφαιρας που προαναφέρθηκε οφείλεται σε περιοριστικούς παράγοντες που διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Οι παράγοντες αυτοί είναι συχνά τα θρεπτικά στοιχεία του αζώτου και του φωσφόρου, τα οποία προσλαμβάνονται και μεταβολίζονται από τους έμβιους οργανισμούς, γεγονός το οποίο μειώνει τη διαθεσιμότητά τους αυτή η μείωση της διαθεσιμότητας είναι που περιορίζει την ανεξέλεγκτη ανάπτυξη της ζωής. Χάρη στην περίπλοκη δομή του τροφικού ιστού, όμως, τα θρεπτικά στοιχεία υφίστανται μια διαρκή ανακύκλωση, επιτρέποντας έτσι τη διατήρηση της ζωής στη Γη. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία επιτελεί τον δικό του κύκλο εντός της γήινης βιόσφαιρας με τους δικούς του εξισορροπημένους

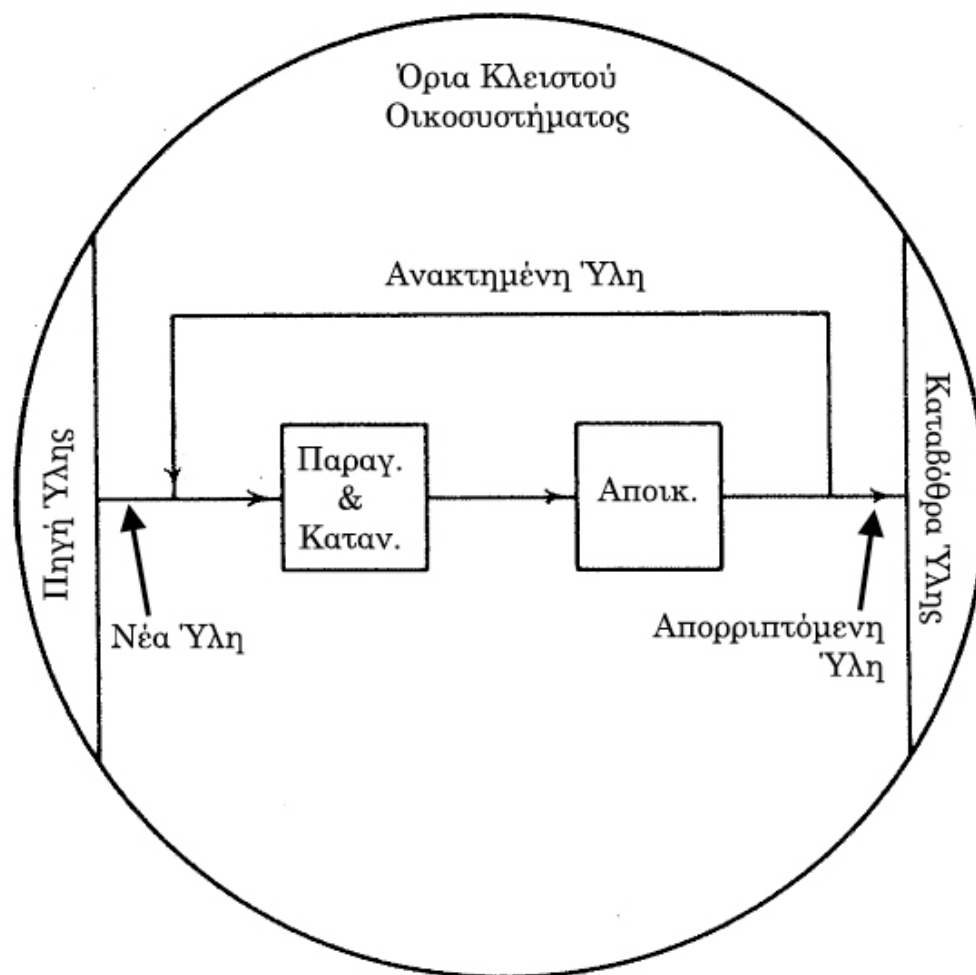
ρυθμούς, οι οποίοι, εδώ και εκατομμύρια χρόνια, εξασφάλιζαν για τους έμβιους οργανισμούς σταθερές συγκεντρώσεις των απαραίτητων πρώτων υλών στο περιβάλλον (Gitelson, et al., 2003) (Eckart, 1996).

Αν και αυτή η σταθερότητα των διαθέσιμων υλικών στο περιβάλλον είναι εκείνη που υποστηρίζει και εγγυάται την επιβίωση της ζωής στη Γη, εντούτοις η αυξανόμενη βιομηχανική δραστηριότητα του ανθρώπινου είδους εντός της γήινης βιόσφαιρας διαταράσσει έντονα αυτούς τους κλειστούς κύκλους. Βέβαια, το φυσικό περιβάλλον και οι ανθρώπινες κοινωνίες βρίσκονται σε μια διαρκή αλληλεπίδραση και συνδιαμόρφωση εδώ και χιλιετίες. Μετά τη Βιομηχανική Επανάσταση, όμως, η επίδραση της ανθρώπινης τεχνολογίας στο φυσικό περιβάλλον απέκτησε σταδιακά έναν περισσότερο συστηματικό και παγκόσμιο χαρακτήρα. Σήμερα, χάρη στην ακμάζουσα τεχνολογική πρόοδο στον τομέα της πληροφορικής και των επικοινωνιών, ο προτέρως τοπικός και αποκεντρωμένος χαρακτήρας των ανθρώπινων βιομηχανικών δραστηριοτήτων έχει μεταβληθεί ριζικά, καθώς τα βιομηχανικά συστήματα έχουν λάβει τις διαστάσεις ενός παγκοσμίως συγχρονισμένου δικτύου. Αυτή η έντονη τεχνολογική δραστηριότητα του ανθρώπινου είδους έχει τροποποιήσει σε τέτοιο βαθμό τη γήινη βιόσφαιρα ώστε η παραδοσιακή σχέση διάστασης μεταξύ του φυσικού και του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος έχει πλέον αντικατασταθεί από μια σχέση σύζευξης. Η συνειδητοποίηση όλων των παραπάνω έχει οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στην πρόταση ενός νέου όρου για αυτήν τη νέα εποχή που διανύουμε: την εποχή κατά την οποία η γήινη βιόσφαιρα είναι εν μέρει δημιούργημα του συνόλου της ανθρώπινης τεχνολογικής δραστηριότητας. Ο όρος που έχει προταθεί για αυτήν τη νέα γεωλογική εποχή είναι «η Ανθρωπόκαινος»· η Εποχή του Ανθρώπου (Gitelson, et al., 2003) (Eckart, 1996) (Allenby, 2005) (Allenby, 2012).

Η περιπλοκότητα των σχέσεων που διέπουν τα υποσυστήματα της γήινης βιόσφαιρας έχει οδηγήσει τους ειδικούς ερευνητές στην ανάγκη αξιοποίησης μαθηματικών ομοιωμάτων και υπολογιστικών προσομοιώσεων, με στόχο την καλύτερη κατανόηση του δυναμικού της χαράκτηρα. Εντούτοις, οι προσομοιώσεις αυτές είναι αδύνατον να παρέχουν διαφωτιστικές απαντήσεις ως προς το πιο θεμελιώδες λειτουργικό χαρακτηριστικό της βιόσφαιρας: τους μηχανισμούς που διεκπεραιώνουν το κλείσιμο των κύκλων. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η εγγενής αδυναμία των μαθηματικών και υπολογιστικών ομοιωμάτων, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή πειραμάτων σε ομοιώματα με φυσική υπόσταση. Και καθώς η γήινη βιόσφαιρα είναι -για την ώρα- το μόνο γνωστό φυσικό κλειστό οικοσύστημα, ανακύπτει η ανάγκη της κατασκευής τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων. Μάλιστα, ένα επιπρόσθετο όφελος της κατασκευής και της μελέτης τέτοιων επίγειων τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων είναι και η συσσώρευση της απαραίτητης επιστημονικής γνώσης για τη μετέπειτα κατασκευή ενός

προηγμένου βιολογικού διαστημικού συστήματος υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου (Gitelson, et al., 2003) (Eckart, 1996).

Τα τεχνητά κλειστά οικοσυστήματα είναι κατασκευασμένα από τον άνθρωπο οικοσυστήματα, κλειστά ως προς την είσοδο και έξοδο ύλης, τα οποία ανακυκλώνουν πλήρως τη μάζα τους και αυτορρυθμίζονται χάρη στη βιολογική δραστηριότητα των οργανισμών που περικλείουν. Η κατασκευή τους συντελείται μέσω της επιλογής των κατάλληλων βιολογικών οργανισμών, τον σχολαστικό συνδυασμό τους, τόσο ως προς τη συμβατότητα των ειδών τους όσο και ως προς τον πληθυσμό τους, και, τέλος, τον εγκλεισμό τους -μαζί με τους κατάλληλους αβιοτικούς παράγοντες- σε έναν όγκο αρκετά μεγάλο ώστε να μπορεί να παρέχει επαρκή αποθεματική χωρητικότητα για να φιλοξενεί τις ανάλογες ποσότητες των απαραίτητων χημικών στοιχείων στα διάφορα στάδια του κύκλου τους (MacElroy & Avern, 1978).



Σχήμα 3. 1: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση μερικώς ή πλήρως κλειστού οικοσυστήματος σε συνθήκες σταθερής κατάστασης. Προσαρμογή από (Oswald, et al., 1965)

Στο **Σχήμα 3.1** απεικονίζεται σχηματικά ένα μερικώς ή πλήρως κλειστό οικοσύστημα σε συνθήκες σταθερής κατάστασης. Εντός των προκαθορισμένων ορίων του οικοσυστήματος λειτουργεί ένα υποσύστημα παραγωγών και καταναλωτών, το οποίο έχει μια σταθερή απαίτηση σε εισροή ύλης. Επίσης, ένα εμπεριεχόμενο υποσύστημα αποικοδομητών διεκπεραιώνει την ανάκτηση πόρων από τα απόβλητα των παραγωγών και των καταναλωτών. Αυτή η ανακτημένη ύλη επιστρέφει στο υποσύστημα των παραγωγών και καταναλωτών και αντικαθιστά -εν μέρει- την εισροή νέας ύλης από το απόθεμα των χημικών στοιχείων· απόθεμα το οποίο επίσης περικλείεται από τα όρια του κλειστού οικοσυστήματος και λειτουργεί ως πηγή αβιοτικής ύλης για τα υποσυστήματα των οργανισμών του. Τέλος, στην περίπτωση που δεν είναι εφικτή η πλήρης ανακύκλωση της ύλης, μια ποσότητα των αποβλήτων δεν αξιοποιείται από τους αποικοδομητές και απορρίπτεται σε ένα απόθεμα αναξιοποίητης ύλης που λειτουργεί ως καταβόθρα· η ποσότητα αυτή εξαρτάται από την αποδοτικότητα της αποικοδόμησης. Μάλιστα, ο βαθμός κατά τον οποίον το οικοσύστημα αυτό είναι κλειστό προκύπτει ως το ποσοστό της απαιτούμενης εισροής ύλης στο υποσύστημα των παραγωγών και καταναλωτών που υποκαθιστά αυτή η ανακυκλούμενη ύλη. Δηλαδή, σε ένα οικοσύστημα όπου η ανακυκλούμενη ύλη υποκαθιστά πλήρως την απαιτούμενη εισροή ύλης οι απαιτήσεις για νέα ύλη από το αποθεματικό είναι μηδενικές, και ο κύκλος είναι πλήρως κλειστός -σε βαθμό 100%-. Αντίστοιχα, αν η απαιτούμενη εισροή ύλης υποκαθίσταται μόνο κατά το ήμισυ, τότε ο κύκλος είναι μερικώς κλειστός -σε βαθμό 50%- (Oswald, et al., 1965).

Ένα τεχνητό κλειστό οικοσύστημα έχει συνήθως περιορισμένο όγκο. Για αυτόν τον λόγο, ο αριθμός των ειδών που μπορεί να περικλείει είναι επίσης περιορισμένος· το ίδιο περιορισμένη είναι και η ιδιότητα της αυτορρύθμισής του, καθώς η φυσική του αποθεματική χωρητικότητα για τα διάφορα χημικά στοιχεία εξαρτάται άμεσα από τον διαθέσιμο όγκο. Έτσι, φαίνεται πως η διασύνδεση τεχνητών φυσικοχημικών δεξαμενών και μηχανολογικού εξοπλισμού για την κατάλληλη ρύθμιση των αποθεμάτων και την επιτάχυνση των διεργασιών ανακύκλωσης, όπως επίσης και η παρακολούθηση και ο ενεργητικός εξωτερικός έλεγχος του οικοσυστήματος από τον άνθρωπο, είναι, για την ώρα, μονόδρομος. Αυτή η ανάγκη ενεργητικού ελέγχου και διαχείρισης, μάλιστα, γίνεται ακόμη πιο επιτακτική στην περίπτωση που μεταξύ των άλλων βιολογικών οργανισμών περικλείεται στο σύστημα και ο άνθρωπος. Στην περίπτωση αυτή, το τεχνητό κλειστό οικοσύστημα αποκτά έναν συγκεκριμένο σκοπό, κάτι το οποίο δεν διαθέτει από τη φύση της η γήινη βιόσφαιρα: την υποστήριξη της ζωής του ανθρώπου. Στη γήινη βιόσφαιρα, οι ανταλλαγές ύλης ρυθμίζονται στοχαστικά χάρη στην εξισορρόπηση διαφόρων ασυγχρόνιστων διεργασιών που απέχουν στον χρόνο και στον χώρο. Προφανώς, στην περίπτωση που ο άνθρωπος αποτελεί υποσύστημα ενός τεχνητού οικοσυστήματος δεν είναι αποδεκτή η στοχαστική ρύθμιση της επιβίωσης και του πληθυσμού των ατόμων του. Ακόμη, η γήινη

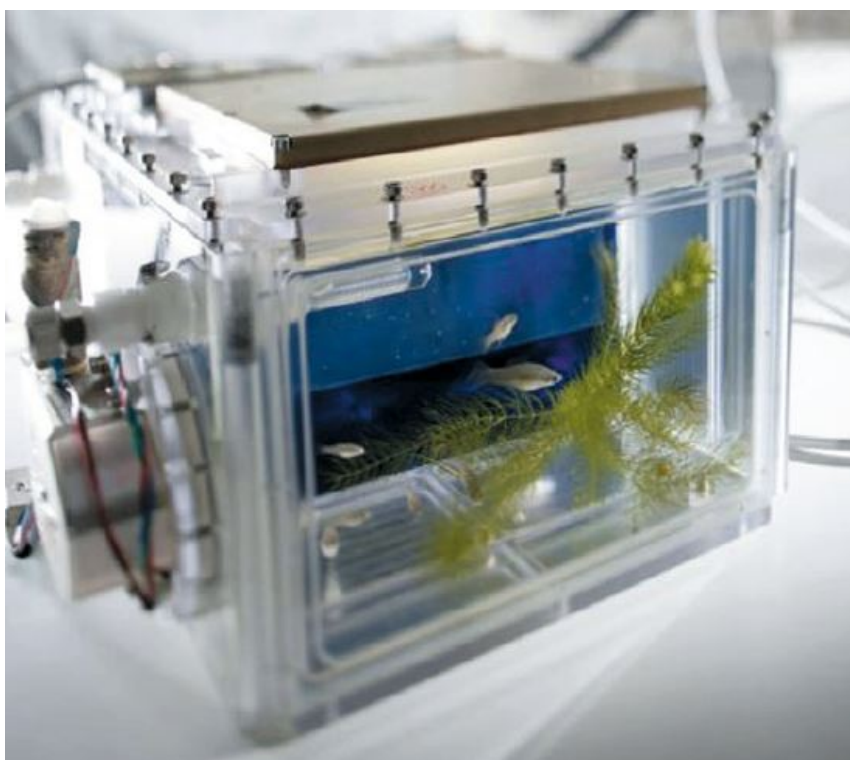
βιόσφαιρα, από τη στιγμή που αναδύθηκε ως υπερκείμενο σύστημα, τροποποιείται και μεταβάλλεται διαρκώς, καθώς ο στοχαστικός της χαρακτήρας οδηγεί τα διάφορα βιολογικά είδη στο να εξελιχθούν προς διάφορες κατευθύνσεις. Σε ένα τεχνητό κλειστό οικοσύστημα, όμως, η εξέλιξη ακόμη και ενός βιολογικού είδους μπορεί να διαταράξει τις ισορροπίες, να μειώσει την αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος και να θέσει σε κίνδυνο την επιβίωση του ανθρώπινου κρίκου. Επομένως, είναι απαραίτητη η επιβολή ανθρωπογενούς τεχνητής -και όχι φυσικής- επιλογής στους κατώτερους βιολογικούς οργανισμούς, προκειμένου να αποφευχθεί μια εξέλιξη τους που θα οδηγούσε σε αστάθεια. Φαίνεται, δηλαδή, πως ένα τεχνητό κλειστό οικοσύστημα με τον άνθρωπο στη θέση του καταναλωτή κορυφής δεν θα πρέπει να μιμηθεί μόνο το φυσικό περιβάλλον της γήινης βιόσφαιρας, αλλά θα πρέπει να ενσωματώσει σε αυτήν τη σύνθεση και τα κατάλληλα τεχνολογικά υποσυστήματα· εξάλλου αυτή η συνύπαρξη των φυσικών και τεχνολογικών συστημάτων είναι πλέον η πραγματικότητα της Ανθρωπόκαινου Εποχής. Ένα τέτοιο σύστημα θα προσομοιάζει, ουσιαστικά, περισσότερο σε ένα αγρο-οικοσύστημα παρά σε ένα φυσικό οικοσύστημα (MacElroy & Averner, 1978) (Morowitz, et al., 2005) (Gitelson, et al., 2003) (Nelson, et al., 2013).

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν οι σημαντικότερες πειραματικές εγκαταστάσεις τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων στη Γη. Κάποια από αυτά περιέχουν έναν μοναδικό τύπο οικοσυστήματος, ένα αγρο-οικοσύστημα, προκειμένου να υποστηρίξουν τη ζωή των ανθρώπων εντός τους. Άλλα, όμως, αποτελούνται από μια πληθώρα οικοσυστημάτων, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου να προσφέρουν στον ανθρώπινο κρίκο υποστήριξη ζωής με μεγαλύτερη ευστάθεια και αξιοπιστία· στην πραγματικότητα, αυτά τα πολυσύνθετα συστήματα φιλοδοξούν να γίνουν τεχνητές βιόσφαιρες. Και οι δύο τύποι πειραματικών εγκαταστάσεων, όμως, δύνανται να συνεισφέρουν θεωρητικά και πρακτικά τόσο στην κατανόηση των διεργασιών ανακύκλωσης της ύλης που συντελούνται στα φυσικά οικοσυστήματα όσο και στον μελλοντικό σχεδιασμό διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου (Nelson, et al., 2009).

3.2 Πειραματικές εγκαταστάσεις στην Ευρώπη

Οι σημαντικότερες πειραματικές εγκαταστάσεις στην Ευρώπη είναι οι εξής δύο: το κλειστό εξισορροπημένο υδατικό βιολογικό σύστημα (Closed Equilibrated Biological Aquatic System, CEBAS) και το μικρο-οικολογικό εναλλακτικό σύστημα υποστήριξης ζωής (Micro-Ecological Life Support System Alternative, MELiSSA). Το CEBAS έχει επικεντρωθεί κυρίως στο πολύ

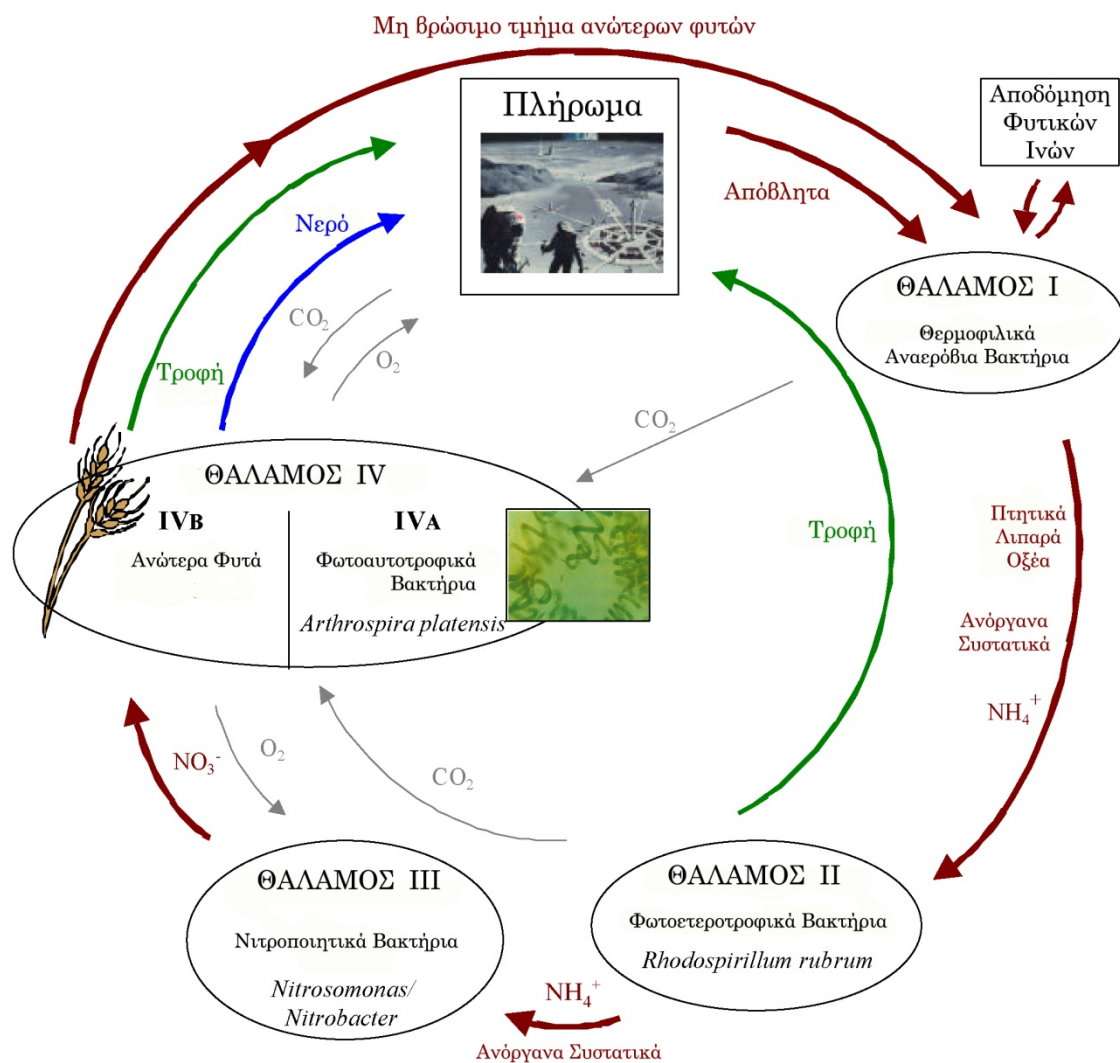
κρίσιμο ζήτημα της διαλεύκανσης της επίδρασης της μικροβαρύτητας στην ανάπτυξη των βιολογικών οργανισμών, καθώς επίσης και στη μελέτη των φυσιολογικών αποκρίσεων των φυτών στις διάφορες μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών. Το MELiSSA διερευνά τη δυνατότητα αξιοποίησης μικροβιακών οργανισμών ως υποσυστήματα ενός διαστημικού συστήματος υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου (Nelson, et al., 2009).



Σχήμα 3. 2: Διαστημική εκδοχή της κλειστής διάταξης CEBAS. Προσαρμογή από (Skoog, 2013)

Το κλειστό εξισορροπημένο υδατικό βιολογικό σύστημα (Closed Equilibrated Biological Aquatic System, CEBAS) είναι το πρώτο τεχνητό κλειστό οικοσύστημα που εκτοξεύθηκε στο διάστημα -το 1998, το 1999 και το 2002- εντός του Διαστημικού Λεωφορείου, αποδεικνύοντας έτσι ότι μπορούσε να λειτουργήσει πλήρως σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Το σύστημα αυτό προέκυψε από τη συνεργασία μεγάλου πλήθους φορέων στη Γερμανία και στις ΗΠΑ και εμπεριέχει υδατικά φυτά, ψάρια, υδατικά ασπόνδυλα και μικροοργανισμούς. Η διάταξη αποτελείται από τέσσερις θαλάμους: ο πρώτος θάλαμος περιέχει τα ψάρια -*Xiphophorus helleri*- και τα υδρόβια σαλιγκάρια -*Biomphalaria glabrata*-· ο δεύτερος περιέχει τα άρριζα υδρόβια φυτά -*Ceratophyllum demersum*-· ο τρίτος περιέχει τους μικροοργανισμούς -μύκητες, βακτήρια και πρωτόζωα-· και ο τελευταίος περιέχει ένα βακτηριακό φίλτρο νιτροποίησης της αμμωνίας. Το σχηματιζόμενο κλειστό οικοσύστημα λειτουργεί ως εξής: τα υδρόβια φυτά παράγουν μέσω της

φωτοσύνθεσης οξυγόνο και βιομάζα: τα ψάρια και τα υδρόβια σαλιγκάρια καταναλώνουν το οξυγόνο και τη βιομάζα των φυτών και παράγουν CO₂ και άλλες μεταβολικές απεκκρίσεις: οι μικροοργανισμοί και τα νιτροβακτήρια αποικοδομούν και ανοργανοποιούν τα μεταβολικά απόβλητα και τη νεκρή βιομάζα με τη βοήθεια οξυγόνου και παράγουν CO₂ και θρεπτικά άλατα: και, τέλος, τα υδρόβια φυτά αξιοποιούν το CO₂ και θρεπτικά άλατα για να συνεχίσουν τον τροφικό κύκλο μέσω της φωτοσύνθεσης. Εκτός από τις εξαιρετικές μελλοντικές προοπτικές για ενσωμάτωση σε ένα διαστημικό σύστημα υποστήριξης ζωής, το CEBAS δύναται να συνεισφέρει ως πειραματική διάταξη και για την ανάπτυξη αποδοτικότερων επίγειων ιχθυοκαλλιεργειών. Η διαστημική εκδοχή αυτής της διάταξης, που φαίνεται στο **Σχήμα 3.2**, είχε συνολικό όγκο περίπου 10 λίτρων και η μέγιστη παραμονή της στο διάστημα ήταν έξι ημέρες, ενώ η επίγεια εκδοχή της έχει συνολικό όγκο 150 λίτρων και έχει δοκιμαστεί επιτυχώς για χρονικές διάρκειες που αγγίζουν και το ένα έτος (Gitelson, et al., 2003) (Skoog, 2013) (Eckart, 1996) (Nelson, et al., 2009).



Σχήμα 3. 3: Διαγραμματική απεικόνιση του κλειστού συστήματος MELISSA. Προσαρμογή από (Skoog, 2013)

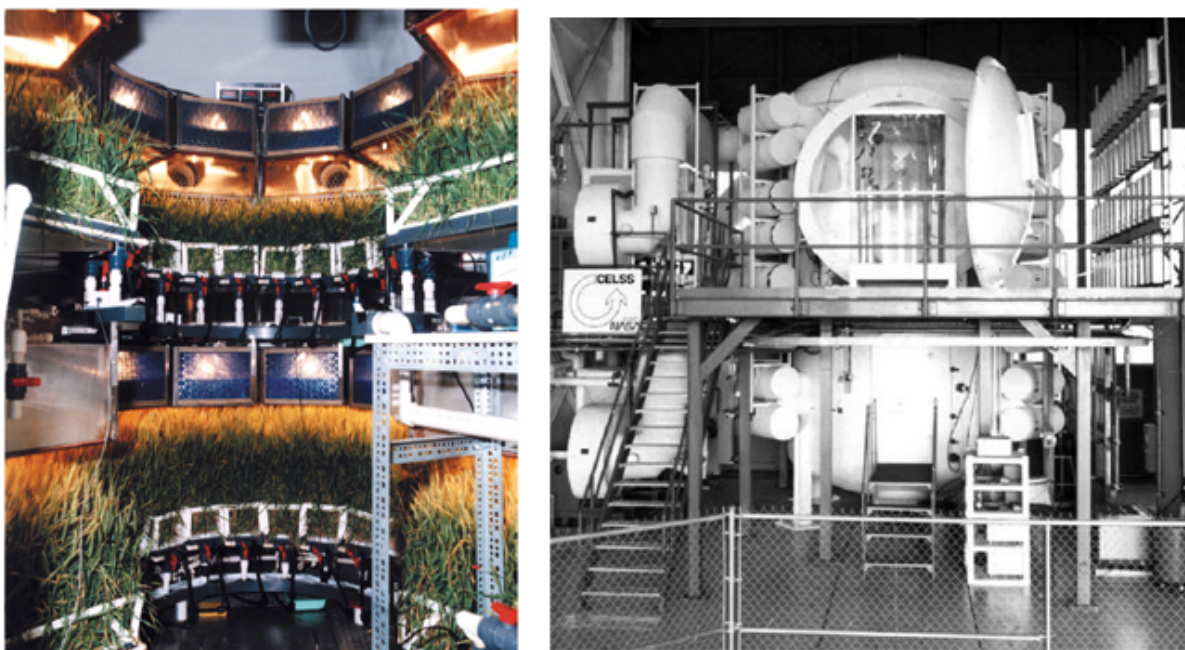
Το μικρο-οικολογικό εναλλακτικό σύστημα υποστήριξης ζωής (Micro-Ecological Life Support System Alternative, MELiSSA) στοχεύει στην καλύτερη κατανόηση των τεχνητών οικοσυστημάτων και στην ανάπτυξη των κατάλληλων τεχνολογιών για τα μελλοντικά βιολογικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου που θα υποβοηθήσουν τις μακροχρόνιες επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις στον πλανήτη Άρη ή στην εγκαθίδρυση μιας ερευνητικής βάσης στη Σελήνη. Το σύστημα αυτό είναι αποτέλεσμα διεθνούς συνεργασίας μεταξύ φορέων του Καναδά και πλήθους κρατών της Ευρώπης, υπό την εποπτεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency, ESA), και χρησιμοποιεί πέντε διακριτούς αλλά διασυνδεδεμένους θαλάμους, οι οποίοι παρουσιάζονται διαγραμματικά στο **Σχήμα 3.3**, για να εξομοιώσει ένα κλειστό υδατικό οικοσύστημα. Οι πρώτοι τρεις θάλαμοι διεκπεραιώνουν τη σταδιακή επεξεργασία των υγρών και στερεών μεταβολικών αποβλήτων του ανθρώπινου πληρώματος και της μη βρώσιμης βιομάζας των ανώτερων φυτών και των φωτοετεροτροφικών βακτηρίων σε τρία βήματα. Πρώτα, όλα τα προαναφερθέντα απόβλητα συλλέγονται στον Θάλαμο I, όπου υφίστανται αναερόβια ζύμωση από ένα μείγμα διαφόρων ειδών θερμοφιλικών βακτηρίων σε υψηλή θερμοκρασία - 55°C-. Έπειτα, τα κύρια προϊόντα αυτής της αναερόβιας ζύμωσης -κατιόντα αμμωνίου, πτητικά λιπαρά οξέα και ανόργανα συστατικά- προωθούνται στον Θάλαμο II, όπου καταναλώνονται από τα φωτοετεροτροφικά βακτήρια *Rhodospirillum rubrum*. Τέλος, τα εναπομείναντα ανόργανα συστατικά και τα κατιόντα αμμωνίου καταλήγουν στον Θάλαμο III, όπου υφίστανται νιτροποίηση από ένα μίγμα νιτροποιητικών βακτηρίων των γενών *Nitrosomas* και *Nitrobacter*, με παράλληλη κατανάλωση οξυγόνου. Μετά από αυτήν την πολυεπίπεδη μικροβιακή επεξεργασία των αποβλήτων, τα παραγόμενα νιτρικά άλατα προωθούνται στα φωτοαυτοτροφικά κυανοβακτήρια *Arthrospira platensis* του Θαλάμου IV_A και στα ανώτερα φυτά του Θαλάμου IV_B, όπου και δεσμεύονται -μαζί με το CO₂ που διοχετεύεται εκεί από το ανθρώπινο πλήρωμα και από τους Θαλάμους I και II-. Οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί των Θαλάμων IV_A και IV_B προσφέρουν στο πλήρωμα οξυγόνο, νερό και τροφή. Ως συμπλήρωμα διατροφής χρησιμοποιούνται, επίσης, και τα φωτοετεροτροφικά βακτήρια του Θαλάμου II. Τα υποψήφια ανώτερα φυτά που μπορούν μελλοντικά να χρησιμοποιηθούν στον Θάλαμο IV_B είναι: σιτάρι, ντομάτες, πατάτες, σόγια, ρύζι, σπανάκι, μαρούλι και κρεμμύδι. Αυτήν τη στιγμή η πιλοτική πειραματική διάταξη είναι πλήρως λειτουργική στη Βαρκελώνη -ήδη από το 2009- με ποντίκια στη θέση του πληρώματος, αλλά ο στόχος είναι να γίνει εφικτή η υποστήριξη ενός ανθρώπινου πληρώματος σε έναν χρονικό ορίζοντα μεταξύ του 2020-2025 (Gitelson, et al., 2003) (Skoog, 2013) (Eckart, 1996) (Nelson, et al., 2009).

3.3 Πειραματικές εγκαταστάσεις στις ΗΠΑ

Ήδη από τη δεκαετία του 1950, το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη βιολογικών τεχνολογιών υποστήριξης ζωής στις ΗΠΑ ήταν αυξημένο. Η πρώτη από τις σχετικές έρευνες είχε σκοπό την ανάπτυξη μικροφυκών σε κλειστά συστήματα βιοαντιδραστήρων για την παροχή οξυγόνου στους πιλότους της πολεμικής αεροπορίας. Μετέπειτα -αμφίβολης επιτυχίας- πειράματα με ζώα, τα οποία τελούσαν υπό την αιγίδα και τον συντονισμό της NASA, οδήγησαν το 1978 σε τρία κρίσιμα πορίσματα που αποτέλεσαν και τα θεμέλια των πειραματικών εγκαταστάσεων που ακολούθησαν: ένα σύστημα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου θα ήταν όντως ένα τεχνητό οικοσύστημα, αλλά θα έπρεπε να μιμείται ένα αγρο-οικοσύστημα και όχι ένα φυσικό απομονωμένο οικοσύστημα· ο άνθρωπος θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί ως ένα σημαντικό υποσύστημα αυτής της διάταξης· και, τέλος, αντίθετα με ένα φυσικό οικοσύστημα, ένα τεχνητό οικοσύστημα θα έπρεπε να έχει σκοπό του την υποστήριξη ζωής του ανθρώπινου κρίκου του. Οι δύο σημαντικότερες πειραματικές εγκαταστάσεις που αναπτύχθηκαν μετά το 1978 ως απότοκοι αυτών των πορισμάτων είναι το πρόγραμμα των κλειστών οικολογικών συστημάτων υποστήριξης ζωής (Closed Ecological Life Support Systems, CELSS) της NASA και η Βιόσφαιρα 2 (Biosphere 2) (Gitelson, et al., 2003) (Nelson, et al., 2009).

Το πρόγραμμα των κλειστών οικολογικών συστημάτων υποστήριξης ζωής (Closed Ecological Life Support Systems, CELSS) ξεκίνησε το 1978 σε τρία ερευνητικά κέντρα της NASA. Ο πυρήνας του προγράμματος αυτού ήταν η πεποίθηση πως οι μονοκαλλιέργειες μονοκύτταρων οργανισμών, τόσο φωτοσυνθετικών όσο και χημικοσυνθετικών, αδυνατούν να οδηγήσουν το σχηματιζόμενο οικοσύστημα σε ευστάθεια. Για τον λόγο αυτό, στην καρδιά του CELSS αποφασίστηκε να τοποθετηθούν ανώτερα βρώσιμα φυτά παραδοσιακών αγροτικών καλλιεργειών, τα οποία θα μπορούσαν επίσης να συνεισφέρουν στην παροχή οξυγόνου και νερού, καθώς και στη διαχείριση των αποβλήτων. Οι σοδειές που μελετήθηκαν ως προς τη δυνατότητα κάλυψης των διατροφικών αναγκών του ανθρώπου ήταν η σόγια, οι λευκές πατάτες, οι γλυκοπατάτες και μια ποικιλία ημινάνου σίτου. Μετά την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας αυτών των ανώτερων φυτών σε εργαστηριακές συνθήκες, ξεκίνησε η παράλληλη ανάπτυξη μεγαλύτερων πειραματικών διατάξεων εντός του CELSS, από τη μηχανή σαλάτας (salad machine) για τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό έως τους θαλάμους ανάπτυξης φυτών μεγάλης κλίμακας για χρήση σε ανθρώπινα ενδιααιτήματα. Ένα τέτοιο σύστημα μεγάλης κλίμακας που αξιοποιεί τεχνητό φωτισμό και υδροπονία είναι ο θάλαμος παραγωγής βιομάζας με εμβαδό 20m² (Biomass Production Chamber, BPC) της πειραματικής εγκατάστασης προηγμένων συστημάτων υποστήριξης ζωής (Advanced Life Support System Test Bed, ALSSTB)· ο BPC και η ALSSTB απεικονίζονται στο **Σχήμα 3.4**. Η ALSSTB είναι το μεγαλύτερο

πειραματικό σύστημα υποστήριξης ζωής της NASA και το πρώτο αμερικανικό τεχνητό κλειστό οικοσύστημα που συμπεριέλαβε τον ανθρώπινο κρίκο μεταξύ των άλλων βιολογικών και φυσικοχημικών τεχνολογιών. Η μεγαλύτερη επιτυχία της ALSSTB ήταν η κάλυψη όλων των αναγκών ενός πληρώματος τεσσάρων ανθρώπων για τρεις μήνες και η πλήρης ανακύκλωση των αποβλήτων τους, μέσω της συνέργειας και του υβριδισμού βιολογικών και φυσικοχημικών υποσυστημάτων. Ο απώτερος στόχος των τωρινών και μελλοντικών πειραματικών εγκαταστάσεων του προγράμματος CELSS είναι η υποστήριξη ζωής κλειστού κύκλου ενός πληρώματος τεσσάρων ανθρώπων για περιόδους που ξεπερνούν το ένα έτος (Gitelson, et al., 2003) (Skoog, 2013) (Nelson, et al., 2009).



Σχήμα 3. 4: Ο θάλαμος παραγωγής βιομάζας -αριστερά- του συστήματος ALSSTB -δεξιά- που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος CELSS. Προσαρμογή από (Skoog, 2013) (Nelson, et al., 2009)

Η Βιόσφαιρα 2 (Biosphere 2) είναι μια πρωτοποριακή εργαστηριακή εγκατάσταση έρευνας και ανάπτυξης που σχεδιάστηκε για τη μελέτη της οικολογίας σε βιοσφαιρική κλίμακα, αλλά και για την εξακρίβωση της δυνατότητας παροχής υποστήριξης ζωής στον άνθρωπο με τη χρήση βιολογικών υποσυστημάτων. Η εγκατάσταση αυτή οικοδομήθηκε την περίοδο 1986-1989 στην Αριζόνα των ΗΠΑ με ιδιωτική χρηματοδότηση και είχε ως απώτερο σκοπό τη μακροχρόνια παρακολούθηση -διάρκειας 50 έως 100 ετών- των περίπλοκων δυναμικών αλληλεπιδράσεων επτά μεγακοινοτήτων (biomes): ενός κοραλλιογενούς υφάλου, ενός βάλτου, ενός τροπικού δάσους, μιας σαβάνας, μιας ερήμου, ενός αγρο-οικοσυστήματος και ενός ανθρώπινου ενδιαιτήματος. Η κατασκευή της ήταν αεροστεγής -με ετήσιο ρυθμό

απωλειών μικρότερο του 10%- και περιέκλειε 200000m³ ατμόσφαιρας και 4000 διαφορετικά είδη ζωής σε μια έκταση 13000m². Το ανθρώπινο ενδιαίτημά της μπορούσε να φιλοξενήσει οκτώ ανθρώπους. Ολόκληρη η εγκατάσταση εμπεριεχόταν σε ένα κέλυφος μεταβαλλόμενου σχήματος που εξασφάλιζε την υλική της απομόνωσή από τη γήινη βίοςφαιρα -τη Βίοςφαιρα 1-· το συγκρότημα των κατασκευών της εγκατάστασης διακρίνεται στο **Σχήμα 3.5**. Εντούτοις, το σύστημα ήταν ανοιχτό ως προς τη ροή ενέργειας και πληροφορίας, καθώς διέθετε ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα θέρμανσης, ψύξης, παροχής ηλεκτρικής ισχύος και τηλεπικοινωνιών. Το 1991 η Βίοςφαιρα 2 σφραγίστηκε για πρώτη φορά με σκοπό να φιλοξενήσει ένα πλήρωμα οκτώ ανθρώπων για δύο έτη. Το πρώτο πλήρωμα ήταν επιφορτισμένο με τις αγροτικές δραστηριότητες του αγροοικοσυστήματος, την παρακολούθηση και τη διαχείριση των άλλων μεγακοινοτήτων και τη συντήρηση του ηλεκτρομηχανολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που βρίσκονταν εντός της εγκατάστασης. Μετά την αξιολόγηση εκείνης της πρώτης αποστολής, το 1994 η Βίοςφαιρα 2 φιλοξένησε και ένα δεύτερο πλήρωμα επτά ανθρώπων για έξι μήνες. Η διατροφή των πληρωμάτων ήταν πλούσια και θρεπτική και βασιζόταν σε περισσότερα από ογδόντα είδη φυτικών καλλιεργειών, γάλα κατσίκας, αυγά και μικρή ποσότητα ζωικού κρέατος. Αν και αυτές οι δύο αποστολές απέδωσαν πληθώρα επιστημονικών δεδομένων, το τεχνητό οικοσύστημα δεν κατάφερε ποτέ να έρθει σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Για τον λόγο αυτό, δεν υπήρξε συνέχιση των αποστολών με νέα πληρώματα, και η Βίοςφαιρα 2 αποφασίστηκε να αποσφραγισθεί και να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς (Gitelson, et al., 2003) (Skoog, 2013) (Eckart, 1996) (Nelson, et al., 2009).



Σχήμα 3. 5: Το συγκρότημα των εγκαταστάσεων των επτά συνδεδεμένων μεγακοινοτήτων του τεχνητού κλειστού οικοσυστήματος Biosphere 2. Προσαρμογή από (Nelson, et al., 2009)

3.4 Πειραματικές εγκαταστάσεις στη Ρωσία

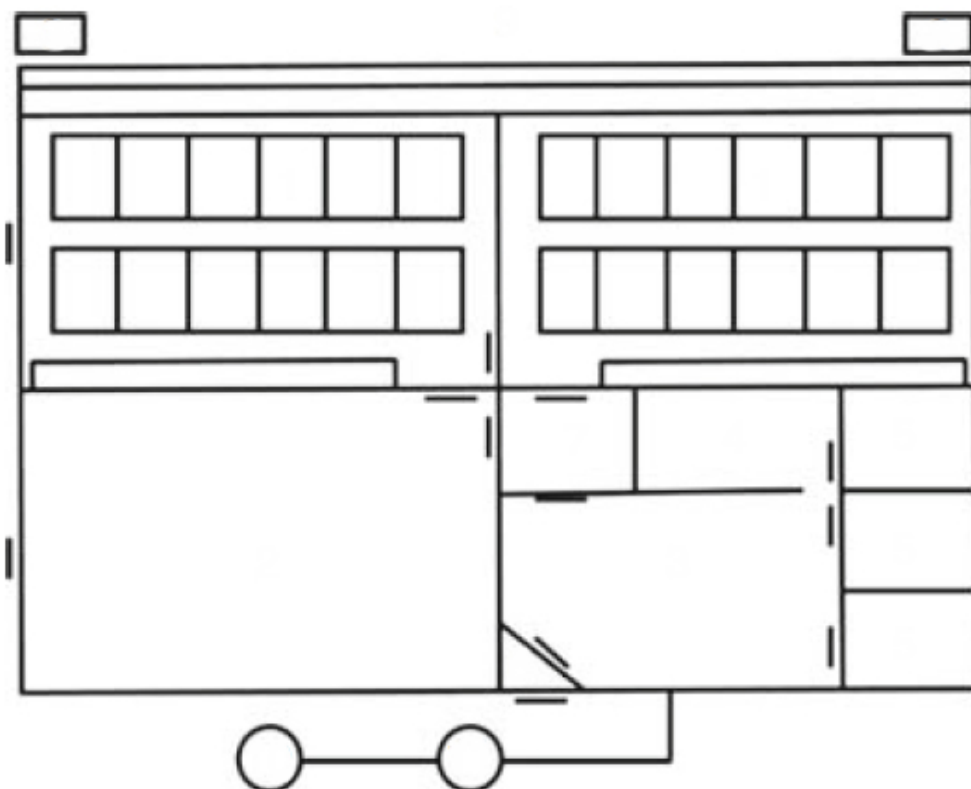
Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας για την κατασκευή πειραματικών τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων στη Ρωσία πηγάζει ιστορικά από τη σκέψη του Κ.Ε. Tsiolkovsky, ο οποίος συνέλαβε την ιδέα μιας πρώιμης εκδοχής διαστημικών θερμοκηπίων για την υποστήριξη ζωής των αστροναυτών σε μακροχρόνιες πτήσεις, και του V.I. Vernadsky, ο οποίος ανέπτυξε μια θεώρηση της βιόσφαιρας ως ένα οικοσύστημα κλειστού κύκλου πλανητικού επιπέδου με τη δυνατότητα διατήρησης της ζωής επ' άπειρον. Τα πρώτα πειράματα για τη δημιουργία τεχνητών βιολογικών συστημάτων υποστήριξης ζωής με πλήρη ανακύκλωση ύλης στη Σοβιετική Ένωση ξεκίνησαν τη δεκαετία του '60 σε δύο εξειδικευμένα ερευνητικά ιδρύματα: στο Ίδρυμα Βιοϊατρικών Προβλημάτων (Institute of Biomedical Problems, IBMP) της Μόσχας και στο Ίδρυμα Βιοφυσικής (Institute of Biophysics) στο Κρασνογιάρσκ της Σιβηρίας (Nelson, et al., 2009).

Το Ίδρυμα Βιοϊατρικών Προβλημάτων (Institute of Biomedical Problems, IBMP) της Μόσχας αφιέρωσε μια αυτόνομη ερευνητική μονάδα στην εξακρίβωση εκείνων των αρχών της βιοτεχνολογίας που θα έθεταν αργότερα τα θεμέλια των βιολογικών συστημάτων υποστήριξης ζωής. Για τον σκοπό αυτό, το IBMP συμπεριέλαβε στο ανθρώπινο δυναμικό του τους ιατρούς και βιολόγους που συμμετείχαν στον σχεδιασμό και την εκτέλεση των πρώτων διαστημικών πτήσεων με ζώα και, μετέπειτα, με ανθρώπους. Κατά τη διάρκεια των ερευνών τους, οι επιστήμονες του IBMP ανέπτυξαν τόσο τις γενικές ιδέες σχετικά με τη βιολογία των κλειστών οικοσυστημάτων όσο και τις προοπτικές των εφαρμογών τους στα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής. Αρχικά, το ενδιαφέρον των ερευνητών επικεντρώθηκε στην πολυλειτουργική αξιοποίηση των μικροφυκών -και ειδικά ενός θερμοφιλικού στελέχους του είδους *Chlorella vulgaris*- τόσο στην εξυγίανση του νερού και της ατμόσφαιρας όσο και στην κατανάλωσή τους από τους ανθρώπους. Ως προς το κλείσιμο του κύκλου της ατμόσφαιρας, σε πειραματικές διατάξεις ανθρώπου-μικροφυκών σημειώθηκε έως και 90% ανακύκλωση του οξυγόνου. Από την άλλη, ως προς το κλείσιμο του κύκλου της τροφής, έγινε γρήγορα κατανοητό πως τα μικροφύκη, εξαιτίας της βιοχημικής τους σύστασης, δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως βασική τροφή. Αυτή η διαπίστωση οδήγησε την έρευνα σε μια στροφή προς την αξιοποίηση ανώτερων βρώσιμων φυτών για την κάλυψη των διατροφικών αναγκών των ανθρώπων. Έτσι, στο σύστημα ανθρώπου-μικροφυκών προστέθηκε ένα θερμοκήπιο 15m², το οποίο παρήγαγε 54g σίτου και 32g λαχανικών ημερησίως. Αυτός ο σίτος και τα λαχανικά μαζί με τη βρώσιμη βιομάζα από τα μικροφύκη *Chlorella vulgaris* μπορούσαν να καλύψουν το 26% της απαιτούμενης ημερήσιας πρόσληψης βιομάζας και το 19% των θερμίδων. Αργότερα, τις δεκαετίες του '70 και του '80, οι έρευνες στράφηκαν στην επιλογή των κατάλληλων ζώων που θα μπορούσαν να ενταχθούν στο τεχνητό οικοσύστημα ανθρώπου-μικροφυκών-

ανώτερων φυτών για να προσφέρουν στους ανθρώπους ζωικές πρωτεΐνες. Οι υποψήφιοι που επιλέχθηκαν ήταν ψάρια, ορτύκια και μαλάκια, η εμβρυική ανάπτυξη των οποίων διεκπεραιώθηκε με επιτυχία στον διαστημικό σταθμό Mir κατά τη δεκαετία του '90. Οι έρευνες του IBMP απέφεραν κλείσιμο του κύκλου της ατμόσφαιρας και του νερού στο τεχνητό οικοσύστημα ανθρώπου-μικροφυκών-ανώτερων φυτών και συνεχίστηκαν επιτυχώς σε συνεργασία με το Ίδρυμα Βιοφυσικής στο Κρασνογιάρσκ, όπως θα συζητηθεί παρακάτω. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί πως απότοκος αυτής της παράδοσης του IBMP στη μελέτη των κλειστών οικοσυστημάτων είναι το διεθνές πρόγραμμα Mars 500 που ξεκίνησε το 2010 στη Μόσχα και είχε σκοπό να προσομοιώσει τις συνθήκες μιας επανδρωμένης αποστολής στον πλανήτη Άρη. Αυτό το πρόγραμμα μελέτησε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ έξι μελών ενός πληρώματος που έζησαν για πεντακόσιες είκοσι ημέρες σε πλήρη απομόνωση εντός των ερμητικά κλειστών πειραματικών εγκαταστάσεων -συνολικού όγκου 500m³- που κατασκευάστηκαν στο IBMP. Μεταξύ των εγκαταστάσεων αυτών συγκαταλέγεται και ένα πειραματικό θερμοκήπιο. Στο **Σχήμα 3.6** διακρίνεται το εσωτερικό του κοινόχρηστου χώρου, του γυμναστηρίου, των ιδιωτικών διαμερισμάτων και του θερμοκηπίου του Mars 500 (Nelson, et al., 2009) (Gitelson, et al., 2003).



Σχήμα 3. 6: Εσωτερικοί χώροι των εγκαταστάσεων του διεθνούς προγράμματος Mars 500 στο IBMP. Γυμναστήριο -πάνω αριστερά-, ιδιωτικό διαμέρισμα -πάνω δεξιά-, κοινόχρηστος χώρος -κάτω αριστερά- και θερμοκήπιο -κάτω δεξιά-. Προσαρμογή από (Skoog, 2013)



Σχήμα 3. 7: Σχέδιο της εγκατάστασης Bios-3 στο Κρασνογιάρσκ της Σιβηρίας. Διαμερίσματα καλλιέργειας ανώτερων φυτών -πάνω αριστερά και δεξιά-, διαμέρισμα καλλιέργειας μικροφυκών -κάτω αριστερά- και διαμέρισμα χώρων πληρώματος -κάτω δεξιά-. Προσαρμογή από (Nelson, et al., 2009)

Στο Ίδρυμα Βιοφυσικής (Institute of Biophysics) στο Κρασνογιάρσκ της Σιβηρίας, τα πειράματα εγκλεισμού ανθρώπων σε πλήρως απομονωμένα οικοσυστήματα είχαν ήδη ξεκινήσει από το 1965. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων, με την ευρύτερη ονομασία Bios-1, διερευνήθηκε η δυνατότητα εξυγίανσης της ατμόσφαιρας σε ένα οικοσύστημα ανθρώπου-μικροφυκών. Μικροφύκη του γένους *Chlorella* -έγκλειστα σε έναν επίπεδο βιοαντιδραστήρα 8m²- χρησιμοποιήθηκαν για την απορρόφηση του CO₂ από την ατμόσφαιρα και για τον εμπλουτισμό της με οξυγόνο, παρέχοντας έτσι μερική υποστήριξη ζωής σε έναν άνθρωπο εντός ενός σφραγισμένου θαλάμου όγκου 5m³ η βιομάζα των μικροφυκών κάλυπτε, επίσης, το 10% των διατροφικών αναγκών αυτού του ανθρώπου. Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων, με την ευρύτερη ονομασία Bios-2, ένας άνθρωπος έζησε εγκλεισμένος σε θάλαμο 15m² για ενενήντα ημέρες με υποστήριξη ζωής από μικροφύκη και υδροπονικές καλλιέργειες ανώτερων φυτών. Αν και αυτοί οι παραγωγικοί οργανισμοί παρείχαν στον άνθρωπο το απαραίτητο οξυγόνο, έως και το 85% της καταναλισκόμενης τροφής, αλλά και το 80% του πόσιμου νερού, εντούτοις φυσικοχημικές μέθοδοι επιστρατεύθηκαν συνεργατικά προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του συστήματος. Στην τρίτη και τελευταία σειρά πειραμάτων, με την ευρύτερη ονομασία Bios-3, η ερευνητική εγκατάσταση

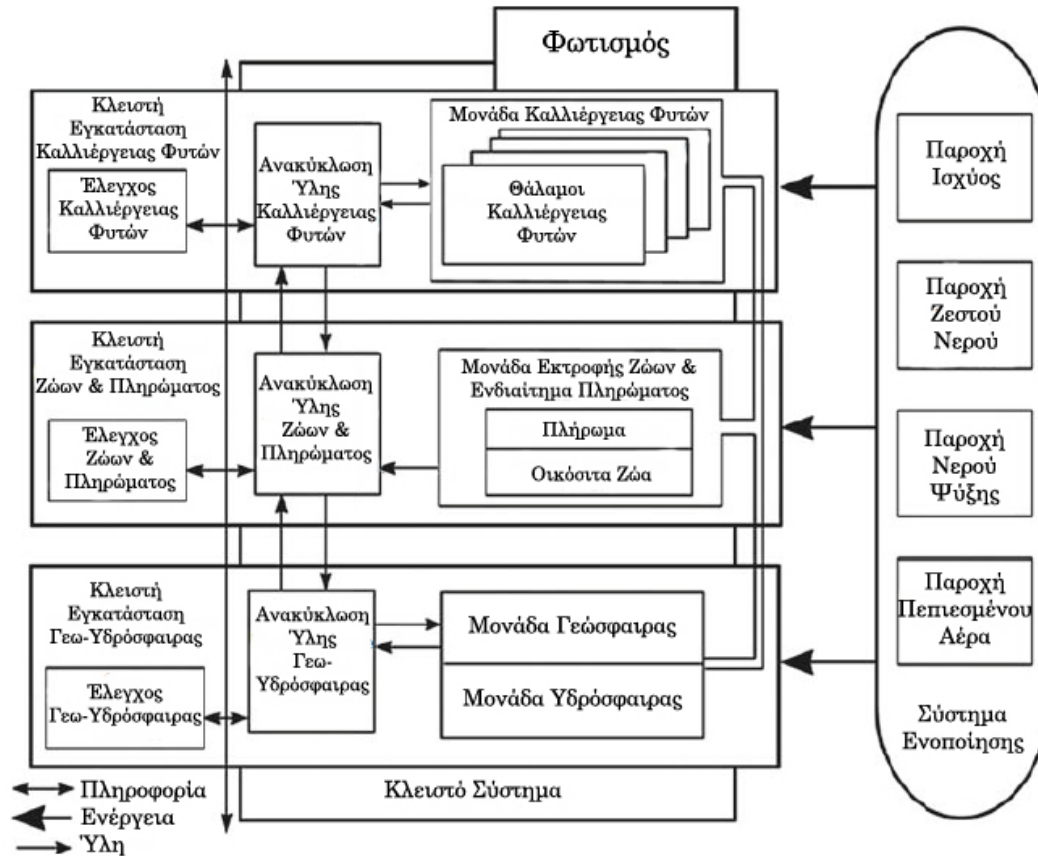
που κατασκευάστηκε είχε όγκο 315m³, καθώς ήταν σχεδιασμένη να φιλοξενεί δύο έως τρία άτομα για μια μέγιστη διάρκεια εκατόν ογδόντα ημερών. Το Bios-3, το σχέδιο του οποίου φαίνεται στο **Σχήμα 3.7**, ήταν διαχωρισμένο σε τέσσερα ισεμβαδικά διαμερίσματα: ένα με τα ιδιωτικά δωμάτια του πληρώματος, την κουζίνα, την τουαλέτα, το δωμάτιο ελέγχου, τα εργαλεία και τις συσκευές για την παρασκευή των γευμάτων και τις επισκευές του εξοπλισμού και τα εφεδρικά φυσικοχημικά συστήματα εξυγίανσης νερού και ατμόσφαιρας και τρία ακόμη που ήταν αφιερωμένα στην καλλιέργεια των βρώσιμων ανώτερων φυτών -κυρίως σίτου και λαχανικών-, αλλά και των μικροφυκών του γένους *Chlorella*. Όπως φαίνεται και από την ύπαρξη του δωματίου ελέγχου, το Bios-3 ήταν η πρώτη πειραματική εγκατάσταση στη Ρωσία που έδινε τη δυνατότητα στο πλήρωμα να ελέγχει και να ρυθμίζει το περιβάλλον του συστήματος εκ των έσω. Ο απαραίτητος φωτισμός παρέχόταν από λάμπες Xenon, καθώς το τεχνητό οικοσύστημα του Bios-3 ήταν σφραγισμένο αεροστεγώς μέσα σε ατσάλινους τοίχους. Καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, ο μέγιστος βαθμός κλεισίματος των κύκλων που επετεύχθη ήταν μεταξύ 80-90%, ενώ οι ενδεδειγμένες ιατρικές εξετάσεις στις οποίες υποβλήθηκαν τα μέλη των έγκλειστων πληρωμάτων δεν έδειξαν κάποια επιδείνωση της υγείας τους ή κάποια απόκλιση των φυσιολογικών παραμέτρων τους από την αρχική τους κατάσταση. Έτσι, το συμπέρασμα που προέκυψε το 1985, μετά το πέρας των σχετικών πειραμάτων, ήταν πως το Bios-3 είχε αποδειχθεί κατάλληλο ως ενδιαίτημα για την κάλυψη των φυσιολογικών και οικολογικών αναγκών ενός υγιούς πληρώματος τριών ανθρώπων για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα (Skoog, 2013) (Eckart, 1996) (Gitelson, et al., 2003) (Nelson, et al., 2009).

3.5 Πειραματικές εγκαταστάσεις στην Ιαπωνία

Οι έρευνες σχετικά με τα τεχνητά κλειστά οικοσυστήματα ξεκίνησαν σχετικά πρόσφατα στην Ιαπωνία -μόλις τη δεκαετία του '90-, αν και η δυνατότητα αξιοποίησης των μικροφυκών είχε σημειωθεί από Ιάπωνες επιστήμονες ήδη από τη δεκαετία του '70. Προτού παρουσιάσουμε τη μεγάλης κλίμακας κλειστή οικολογική πειραματική εγκατάσταση (Closed Ecological Experimental Facility, CEEF) της πόλης Ροκασό στη νήσο Χονσού, αξίζει να περιγράψουμε εν συντομία το ιαπωνικό υδατικό ενδιαίτημα (Japanese Aquatic Habitat) που βρίσκεται εν πτήσει στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό. Το σύστημα αυτό φιλοξενεί μικρά ψάρια του γλυκού νερού σε ένα ενυδρείο, προκειμένου να παρατηρηθούν στον οργανισμό τους οι μακροχρόνιες επιπτώσεις της ακτινοβολίας και των συνθηκών μικροβαρύτητας. Το ενδιαίτημα των ψαριών είναι ανοιχτού κύκλου ως προς το οξυγόνο και την τροφή, που τους παρέχονται από εξωτερική παροχή, αλλά είναι κλειστού

κύκλου ως προς το νερό, το οποίο καθαρίζεται με φυσικοχημικές και βιολογικές μεθόδους προκειμένου να ανακυκλωθεί. Αυτή η διάταξη προσφέρει τη δυνατότητα εκτέλεσης πειραμάτων για ένα χρονικό εύρος έως και τριών μηνών. Το επίγειο τεχνητό κλειστό οικοσύστημα CEEF του Ιδρύματος Περιβαλλοντικών Επιστημών (Institute of Environmental Sciences), από την άλλη, δεν περιορίζεται στην ιχθυοκαλλιέργεια. Αν και οι πρώτες -σχετικά απλοϊκές- έρευνες είχαν την κατεύθυνση της μελέτης των τεχνικών ανακύκλωσης νερού και οξυγόνου, της φυσιολογίας και των τεχνικών καλλιέργειας ανώτερων φυτών και μικροφυκών και της φυσιολογίας και εκτροφής ψαριών και ζώων, εντούτοις, από τη δεκαετία του '90 και έπειτα, οι Ιάπωνες επιστήμονες αντιλήφθηκαν την καίρια σημασία των τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων στη μελέτη και στη διατήρηση της γήινης βιόσφαιρας και -κατ' επέκταση- στη διαφύλαξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Οι εγκαταστάσεις του CEEF καλύπτουν σήμερα μία έκταση 6500m² και αποτελούνται από μία σειρά τεσσάρων διασυνδεδεμένων πειραματικών υποσυστημάτων: μια κλειστή εγκατάσταση καλλιέργειας φυτών, μια κλειστή εγκατάσταση εκτροφής οικόσιτων ζώων, ένα πειραματικό ενδιαίτημα σχεδιασμένο για πλήρωμα δύο ανθρώπων και μια κλειστή εγκατάσταση υδρόσφαιρας και γεώσφαιρας. Τα κατάλληλα φυσικοχημικά υποσυστήματα επεξεργασίας και ανοργανοποίησης των αποβλήτων και ανακύκλωσης της ανακτώμενης ύλης εξασφαλίζουν τη διατήρησή της εντός των σφραγισμένων εγκαταστάσεων του CEEF, γεγονός το οποίο καθιστά τις εγκαταστάσεις αυτές ανοιχτές μόνο ως προς την ενέργεια και την πληροφορία. Το καθένα από τα τέσσερα υποσυστήματα δύναται να λειτουργήσει αυτόνομα ή να συνδεθεί με ένα ή περισσότερα από τα υπόλοιπα, σύμφωνα με τις ανάγκες του εκάστοτε πειράματος. Βεβαίως, το CEEF έχει συγκεκριμένους ερευνητικούς στόχους: κατά πρώτον, την ενδελεχή διερεύνηση της μετακίνησης των ραδιενεργών στοιχείων μέσω των μεταβολικών διαδρομών σε ένα οικοσύστημα και, κατά δεύτερον, τη μοντελοποίηση των αλλαγών που μπορεί να επιφέρει σε παγκόσμιο επίπεδο η κλιματική αλλαγή. Με βάση τα παραπάνω, το CEEF επιβεβαιώνει τη διττή χρήση των τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων που αναφέρθηκε προηγουμένως σε αυτό το κεφάλαιο: δεν χρησιμεύουν μόνο στην ανάπτυξη των τεχνολογιών υποστήριξης ζωής του ανθρώπου στο εχθρικό περιβάλλον του διαστήματος, αλλά πρωτίστως αποσκοπούν στην πειραματική διερεύνηση των προβλημάτων που αντιμετωπίζει η γήινη βιόσφαιρα. Χάρη στην κατασκευή των συστημάτων του, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε διασυνδεδεμένα, οι δυναμικές μεταβολές των ροών της ανακυκλούμενης ύλης μπορούν να παρατηρηθούν και να αναλυθούν ατομικά. Δηλαδή, ενώ οι δύο προαναφερθείσες μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις της Βιόσφαιρας 2 και του Bios-3 ήταν κατά βάση ολιστικές και συνθετικές, το CEEF είναι κατά βάση αναλυτικό. Έτσι, αυτοί οι δύο διαφορετικοί τύποι πειραματικών εγκαταστάσεων μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά ως προς τη διαλεύκανση των ίδιων οικολογικών προβλημάτων από διαφορετικές ιεραρχικές οπτικές. Στο **Σχήμα 3.8** φαίνονται τα τρία

υποσυστήματα του CEEF -το ανθρώπινο ενδιαίτημα είναι συνενωμένο με το υποσύστημα εκτροφής των οικόσιτων ζώων-, καθώς και οι μεταξύ τους ροές ύλης και πληροφορίας (Gitelson, et al., 2003) (Nelson, et al., 2009) (Eckart, 1996).



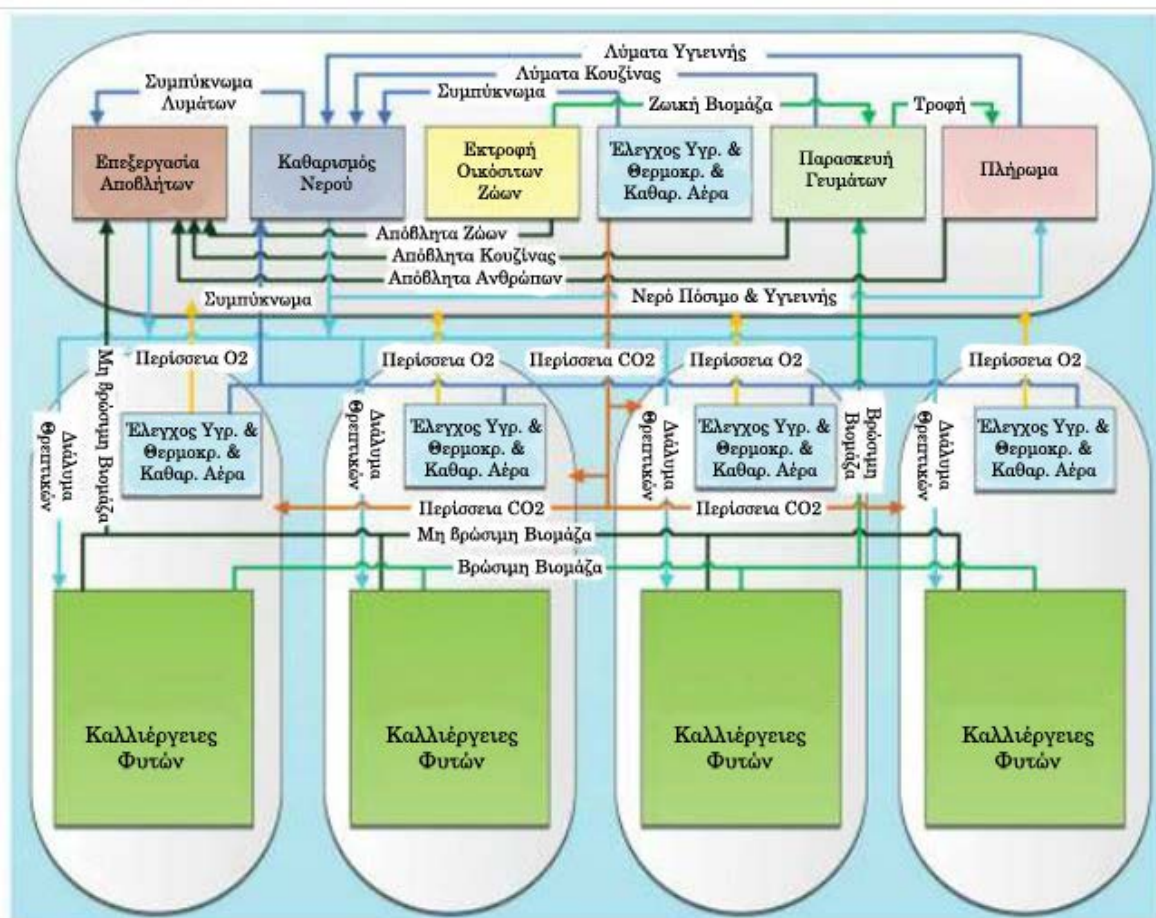
Σχήμα 3. 8: Αναπαράσταση των υποσυστημάτων της εγκατάστασης CEEF στο Ροκασό της Ιαπωνίας και ροές ύλης, πληροφορίας και ενέργειας μεταξύ αυτών. Προσαρμογή από (Nelson, et al., 2009)

3.6 Πειραματικές εγκαταστάσεις στην Κίνα

Η κατασκευή του πρώτου τεχνητού κλειστού οικοσυστήματος στην Κίνα ολοκληρώθηκε το 2013 στο Πανεπιστήμιο Μπεϊχάνγκ του Πεκίνου και ήταν το αποτέλεσμα εντατικού προσχεδιασμού και εξομοιώσεων. Το τεχνητό κλειστό οικοσύστημα για υποστήριξη ζωής σε μόνιμη αστροβάση (Permanent Astrobase Life-support Artificial Closed Ecosystem, PALACE) ετέθη για πρώτη φορά σε λειτουργία το 2014 και φιλοξένησε επιτυχώς ένα τριμελές πλήρωμα για χρονική διάρκεια εκατόν πέντε ημερών. Ο απώτερος σκοπός της δοκιμαστικής λειτουργίας του ήταν να διαπιστωθεί η ωριμότητα των φυσικοχημικών και βιολογικών τεχνολογιών που θα μπορούσαν να συνθέσουν το σύστημα υποστήριξης ζωής μιας μελλοντικής κινεζικής πλανητικής βάσης ή

ενός μελλοντικού κινεζικού διαστημικού σταθμού -του προγράμματος Tiangong-. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων της πρώτης περιόδου εγκλεισμού, με την ευρύτερη ονομασία Lunar Palace 1, το PALACE παρείχε στο πλήρωμα τροφή, οξυγόνο και νερό και διαχειριζόταν τα παραγόμενα απόβλητα μέσω των ακόλουθων βασικών μονάδων του: της μονάδας καλλιέργειας ανώτερων φυτών, της μονάδας εκτροφής ζώων και της μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων. Αυτήν τη στιγμή, η εγκατάσταση βρίσκεται στην πρώτη φάση κατασκευής και πειραματικής λειτουργίας της και αποτελείται από δύο μεγάλους θαλάμους που περιλαμβάνουν και τις προαναφερθείσες μονάδες: τον γενικό θάλαμο και τον θάλαμο των φυτών. Ο γενικός θάλαμος έχει εμβαδό 42m² και εμπεριέχει τέσσερα ιδιωτικά διαμερίσματα για το φιλοξενούμενο πλήρωμα, ένα κοινόχρηστο διαμέρισμα, ένα μπάνιο, έναν χώρο απόρριψης των αποβλήτων προς τη μονάδα επεξεργασίας τους και μία μονάδα εκτροφής ζώων. Ο θάλαμος των φυτών έχει εμβαδό 58m², χρησιμοποιεί τεχνητό φωτισμό και μπορεί να παρέχει βιολογική υποστήριξη ζωής σε τρεις ανθρώπους κατά μέγιστο. Στην επόμενη φάση κατασκευής, θα προστεθεί ένας ακόμη θάλαμος φυτών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η άνετη και ασφαλής βιολογική υποστήριξη ζωής τεσσάρων ατόμων. Τα δεκαέξι είδη ανώτερων φυτών που επιλέχθηκαν για τον θάλαμο καλλιέργειας -μεταξύ άλλων και μπιζέλια, σιτάρι, καρότα, πράσινα λαχανικά και κόνδυλοι κύπερης- κάλυπταν το 60% των διατροφικών αναγκών και το 100% των αναγκών οξυγόνου και νερού του πληρώματος. Για τη μερική κάλυψη των αναγκών του πληρώματος σε ζωική πρωτεΐνη, επιλέχθηκαν οι εξαιρετικά θρεπτικές προνύμφες του σκαθαριού *Tenebrio molitor* -θρεπτικότερες και από ψάρια-, οι οποίες εκτρέφονταν με τη μη βρώσιμη βιομάζα των ανώτερων φυτών. Το μέρος της μη βρώσιμης βιομάζας των φυτών που δεν μπορούσε να αξιοποιηθεί από τις προνύμφες απορριπτόταν μαζί με τα στερεά και ημίρρευστα ανθρώπινα μεταβολικά απόβλητα προς τη μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων, όπου, μετά από αερόβια χώνευση, μετατρέπονταν σε λίπασμα για τον εμπλουτισμό του χωμάτινου υποστρώματος των φυτικών καλλιεργειών. Για την ανάκτηση του νερού και των νιτρικών αλάτων από τα ανθρώπινα ούρα χρησιμοποιήθηκαν φυσικοχημικές τεχνολογίες. Με αυτόν τον τρόπο, ο βαθμός ανακύκλωσης ύλης που πέτυχε το σύστημα ήταν πολύ υψηλός και αναμένεται να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο. Παράλληλα με την παρακολούθηση και την ανάλυση των ροών ύλης στο οικοσύστημα του PALACE, διεξήχθησαν μικροβιολογικές μελέτες για τη διερεύνηση της ανάπτυξης πιθανών παθογόνων μικροοργανισμών, αλλά και ψυχοκοινωνικές μελέτες που χαρτογραφούσαν τη συναισθηματική κατάσταση των εγκλεισμένων ατόμων και τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις τους εντός της ομάδας κατά τη διάρκεια της απομόνωσής τους. Φυσικά, οι εξαιρετικά προηγμένες τεχνολογίες και αποδοτικές τεχνικές που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του PALACE μπορούν να συνεισφέρουν όχι μόνο στην ανάπτυξη ενός βιολογικού συστήματος υποστήριξης ζωής αλλά και σε πλήθος επίγειων εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στην καλλιέργεια φυτών σε ακατάλληλα

περιβάλλοντα -σε νησιά, σε ερήμους, στη θάλασσα και στον αστικό χώρο-, στην επεξεργασία των αγροτικών αποβλήτων -με την παράλληλη εκτροφή προνυμφών *Tenebrio molitor*- και στη βελτίωση της φυσικοχημικής και δομικής κατάστασης των εδαφών -μέσω του εμπλουτισμού τους με καλής ποιότητας οργανική ύλη-. Η τελική εγκατάσταση του PALACE, όπως αναμένεται να διαμορφωθεί μετά από τις προσθήκες των επιπλέον μονάδων που έχουν σχεδιαστεί για τις επόμενες πειραματικές φάσεις, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.9**. Οφείλουμε, τέλος, να σημειώσουμε πως, χάρη στη συνεργατική διαστημική αποστολή SIMBOX της Γερμανίας και της Κίνας, το 2011 βρέθηκε σε περίγεια τροχιά το μικρότερο τεχνητό κλειστό οικοσύστημα που έχει εκτοξευθεί ποτέ. Αυτή η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο θαλάμους οι οποίοι διαχωρίζονται από μία βιομεμβράνη. Ο ένας θάλαμος χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια μικροφυκών του γένους *Euglena*, ενώ ο δεύτερος για την εκτροφή υδρόβιων σαλιγκαριών. Ο σκοπός του πειράματος ήταν η διερεύνηση των δυναμικών καταστάσεων του κύκλου του οξυγόνου σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Οι οργανισμοί αυτοί επιβίωσαν και επέστρεψαν στη Γη, και οι ερευνητές μελετούν το γενετικό τους υλικό για πιθανές βλάβες από τα υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας (Wu & Wang, 2015) (Liu, et al., 2012) (Deng, et al., 2016) (Liu, 2014) (Li, et al., 2015) (Preu & Braun, 2014).

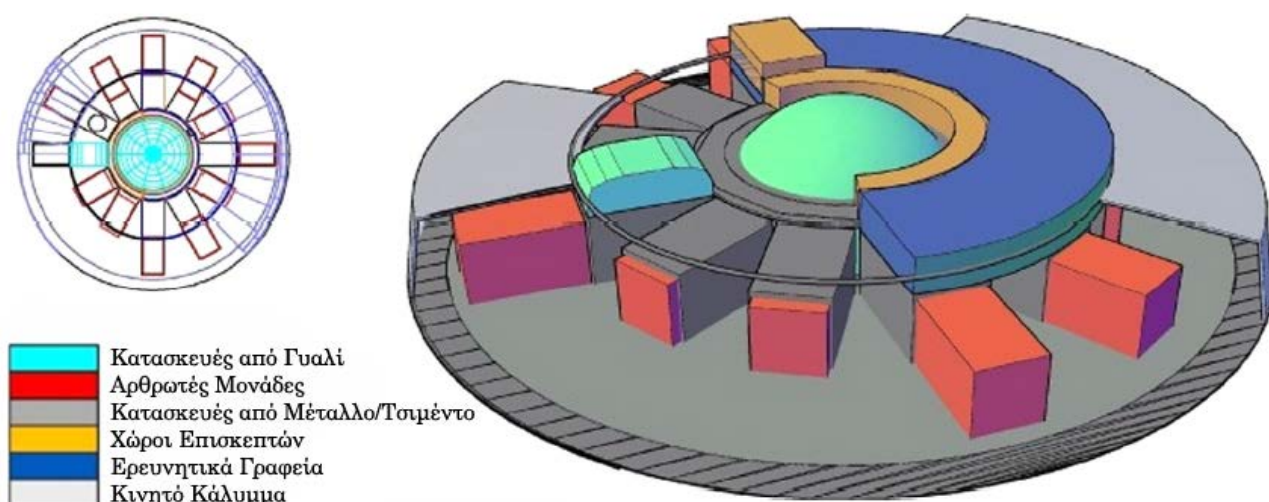


Σχήμα 3. 9: Τελικό σχέδιο των εγκαταστάσεων του PALACE στο Πεκίνο. Προσαρμογή από (Liu, et al., 2012)

3.7 Μελλοντικές προοπτικές

Στις προηγούμενες ενότητες είδαμε τις σημαντικότερες πειραματικές εγκαταστάσεις τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων στην Ευρώπη, στις ΗΠΑ, στη Ρωσία, στην Ιαπωνία και στην Κίνα. Είδαμε, επίσης, ότι οι εγκαταστάσεις αυτές μπορούν να συνεισφέρουν στην κατανόηση των διεργασιών ανακύκλωσης της ύλης που συντελούνται στα φυσικά οικοσυστήματα της γήινης βιόσφαιρας, αλλά και στην ωρίμανση των τεχνολογιών που θα συνθέσουν τα μελλοντικά διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου. Λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που εμφανίζει κάθε μία από αυτές τις εγκαταστάσεις έναντι των υπολοίπων, το μεγάλο οικονομικό κόστος που ενέχει η λειτουργία και η συντήρησή τους, αλλά και τη δυσκολία αναπαραγωγής των ερευνητικών αποτελεσμάτων τους -που έχουν, όμως, παγκόσμια σημασία-, οι ερευνητές του Γερμανικού Κέντρου Αεροδιαστημικής (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) ήδη από το 2014 έχουν σχεδιάσει και προτείνει την κατασκευή μιας πειραματικής εγκατάστασης που θα αποτελείται από αρθρωτές μονάδες. Αυτή η εγκατάσταση εργαστηρίων αειφόρων ενδιαιτημάτων (Facility of Laboratories for Sustainable Habitation, FLaSH) θα επιτρέπει τη δοκιμή κάθε πειραματικής αρθρωτής μονάδας ξεχωριστά πριν τη συνένωσή της με τις υπόλοιπες, επιτρέποντας έτσι μελλοντικές επεκτάσεις και τροποποιήσεις που θα ήταν αδύνατον να γίνουν σε μια μονολιθική εγκατάσταση -σαν αυτές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες-. Οι κύριοι στόχοι του FLaSH είναι, από τη μία, η πειραματική εξακρίβωση της εφικτότητας της λειτουργίας ενός τεχνητού ανθρώπινου ενδιαιτήματος πλήρως κλειστού κύκλου για το διάστημα -και η ανάπτυξη και ωρίμανση των απαραίτητων τεχνολογιών υποστήριξης ζωής- και, από την άλλη, η δοκιμή και η ωρίμανση καινοτόμων τεχνολογιών που μπορούν να έχουν όχι μόνο διαστημικές αλλά και επίγειες εφαρμογές. Το FLaSH αποτελείται από τις εξής δέκα αρθρωτές μονάδες, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός κεντρικού θολωτού θαλάμου: τη μονάδα διαχείρισης ατμόσφαιρας που ελέγχει την κυκλοφορία του αέρα, την υγρασία του, τη θερμοκρασία του και τις ιχνοποσότητες ρύπων, δεσμεύει το CO₂ και παράγει το απαραίτητο οξυγόνο με τη χρήση βιοαντιδραστήρων με μικροφύκη, πρωτίστως, και, δευτερευόντως, με την αξιοποίηση ήδη δοκιμασμένων φυσικοχημικών τεχνολογιών· τη μονάδα διαχείρισης νερού που επεξεργάζεται τα υγρά λύματα της εγκατάστασης με φυσικοχημικές τεχνικές και μικροβιακούς βιοαντιδραστήρες, αποστειρώνει το παραγόμενο νερό και το επιστρέφει στην εγκατάσταση ως πόσιμο νερό ή νερό χρήσης· τη μονάδα διαχείρισης αποβλήτων που δέχεται όλα τα στερεά και ημίρρευστα απόβλητα της εγκατάστασης και τα μετατρέπει σε λίπασμα μέσω αερόβιας χώνευσης· τη μονάδα εκτροφής ζώων που παρέχει στο πλήρωμα φρέσκιες ποσότητες ζωικών πρωτεϊνών μέσω ιχθυοκαλλιέργειας και εκτροφής ακριδών και

προνυμφών *Tenebrio molitor* τη μονάδα καλλιέργειας ανώτερων φυτών που παρέχει φρέσκιες ποσότητες λαχανικών, δημητριακών και βοτάνων για το πλήρωμα -μεταξύ άλλων και καρότα, πατάτες, μαρούλια, κρεμμύδια, ρύζι, σπανάκι, φράουλες, σιτάρι, ντομάτες και φασόλια-, αλλά και μη βρώσιμης φυτικής βιομάζας για την εκτροφή των ζώων, υποστηρίζει την παραγωγή οξυγόνου και τη δέσμευση του CO₂ και συνεισφέρει στην παραγωγή πόσιμου νερού· τη μονάδα ιατροφαρμακευτικής υποστήριξης που μπορεί να καλύψει μεγάλο φάσμα προβλημάτων υγείας, από μικροτραυματισμούς έως χειρουργείο· τη μονάδα κατασκευών που παρέχει τον εξοπλισμό για την επιδιόρθωση διαφόρων αντικειμένων -από ρούχα έως ηλεκτρονικά- ή την κατασκευή νέων μέσω της ανάκτησης γυαλιού, πλαστικών και μετάλλων για την τροφοδοσία 3D εκτυπωτών· τη μονάδα επιτόπιας αξιοποίησης πόρων (in situ resource utilization, ISRU) που χρησιμεύει στη δοκιμή τεχνικών εξόρυξης χρήσιμων πόρων -π.χ. νερού, οξυγόνου και άνθρακα- από την επιφάνεια πλανητικών σωμάτων για την κάλυψη πιθανών απωλειών του συστήματος υποστήριξης ζωής· τη μονάδα κατοίκησης που θα πρέπει να μπορεί να φιλοξενήσει ένα πλήρωμα οκτώ ανθρώπων για τουλάχιστον έναν χρόνο, καλύπτοντας τόσο τις βιολογικές όσο και τις κοινωνικές και πολιτιστικές ανάγκες του· και, τέλος, τη μονάδα επεξεργασίας τροφής που παρέχει τον εξοπλισμό για τη συντήρηση της τροφής και την παρασκευή γευμάτων για οκτώ άτομα. Η όλη εγκατάσταση αναμένεται να καλύψει μια έκταση κατά μέγιστο 6000m² στην Κολωνία της Γερμανίας, και ένα πρώτο σχέδιό της παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.10** (Gitelson, et al., 2003) (Nelson, et al., 2008) (Quantius, et al., 2014).



Σχήμα 3. 10: Σχέδιο της αρθρωτής πειραματικής εγκατάστασης FLASH, όπως σχεδιάστηκε και προτάθηκε από το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής. Προσαρμογή από (Quantius, et al., 2014)

Όπως και σε όλα τα ήδη υπάρχοντα τεχνητά κλειστά οικοσυστήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο έτσι και στην περίπτωση της μελλοντικής κατασκευής του FLaSH, οι ερευνητές τονίζουν τις εξαιρετικές προοπτικές συνεισφοράς αυτών των πειραματικών εγκαταστάσεων όχι μόνο στο πεδίο των διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής και της πειραματικής εξακρίβωσης των θεωριών της οικολογίας αλλά και στο πεδίο των επίγειων εφαρμογών. Έτσι, στο **Κεφάλαιο 4** θα παρουσιαστούν οι διάφοροι επίγειοι τομείς που θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τις καινοτόμες τεχνολογίες υποστήριξης ζωής που δοκιμάζονται στις πειραματικές εγκαταστάσεις αυτών των τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων. Κι αυτό γιατί, τόσο στο επίπεδο των διαστημικών σταθμών και βάσεων μακράς διάρκειας όσο και στο επίπεδο της γήινης βιόσφαιρας, το κρίσιμο ζητούμενο και ο απώτερος στόχος όλων αυτών των φυσικοχημικών και βιολογικών συστημάτων και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων είναι η αειφορία.

3.8 Βιβλιογραφία

Allenby, B., 2005. The Human Earth. In: *Reconstructing Earth. Technology and Environment in the Age of Humans*. s.l.:Island Press, pp. 9-30.

Allenby, B., 2012. So what is different now? Or, why we need sustainable engineering. In: *The Theory and Practice of Sustainable Engineering*. s.l.:Pearson Education, Inc., pp. 1-35.

Deng, S., Xie, B. & Liu, H., 2016. The recycle of water and nitrogen from urine in bioregenerative life support system. *Acta Astronautica*, Volume 123, pp. 86-90.

Eckart, P., 1996. Bioregenerative Life Support Concepts. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 249-364.

Eckart, P., 1996. Biosphere 1 - The Life Support System of the Earth. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 9-38.

Eckart, P., 1996. Fundamentals of Life Support Systems. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 79-174.

Gitelson, I. I., Lisovsky, G. M. & MacElroy, R. D., 2003. Creation of Closed Ecological Systems: Results, Problems and Prospects. In: *Manmade Closed Ecological Systems*. s.l.:Taylor & Francis, pp. 355-368.

Gitelson, I. I., Lisovsky, G. M. & MacElroy, R. D., 2003. Creation of Manmade Closed Ecosystems for Human Life Support: History of Development. In: *Manmade Closed Ecological Systems*. s.l.:Taylor & Francis, pp. 33-62.

Gitelson, I. I., Lisovsky, G. M. & MacElroy, R. D., 2003. Manmade Closed Ecosystems and the Methodology of their Creation. In: *Manmade Closed Ecological Systems*. s.l.:Taylor & Francis, pp. 21-32.

Gitelson, I. I., Lisovsky, G. M. & MacElroy, R. D., 2003. The Earth's Biosphere as a Closed Ecosystem. In: *Manmade Closed Ecological Systems*. s.l.:Taylor & Francis, pp. 11-20.

Li, L. et al., 2015. Rearing *Tenebrio molitor* L.(Coleptera: Tenebrionidae) in the "Lunar Palace 1" during a 105-day multi-crew closed integrative BLSS experiment. *Life sciences in space research*, Volume 7, pp. 9-14.

Liu, H., 2014. *Bioregenerative Life Support Experiment for 90-days in a Closed Integrative Experimental Facility LUNAR PALACE 1*. Abstract F4.5-6-14. Moscow, Russia, 40th COSPAR Scientific Assembly, 2-10 August 2014.

Liu, H. et al., 2012. Bioregenerative Life Support Systems in Space: A Research Update. In: *New Developments in Science and Technology - 60th Anniversary Special Issue*. s.l.:Beihang University (BUAA), A Sponsored Supplement To Science, pp. 86-87.

MacElroy, R. D. & Averner, M. M., 1978. In: *Space ecosynthesis: An approach to the design of closed ecosystems for use in space*. s.l.:NASA-Ames Research Center, NASA TM-78491.

Morowitz, H., Allen, J. P., Nelson, M. & Alling, A., 2005. Closure as a scientific concept and its application to ecosystem ecology and the science of the biosphere. *Advances in Space Research*, Volume 36, pp. 1305-1311.

Nelson, M., Dempster, W. & Allen, J., 2008. "Modular Biosphere" - New testbed platforms for public environmental education and research. *Advances in Space Research*, Volume 41, pp. 787-797.

Nelson, M., Dempster, W. F. & Allen, J. P., 2013. Key ecological challenges for closed systems facilities. *Advances in Space Research*, Volume 52, pp. 86-96.

Nelson, M. et al., 2009. Closed Ecological Systems, Space Life Support and Biospherics. In: L. K. Wang, V. Ivanov, J. Tay & Y. Hung, eds. *Handbook of Environmental Engineering, Volume 10: Environmental Biotechnology*. s.l.:Humana Press, New York, NY, pp. 517-566.

Oswald, W. J., Golueke, C. G. & Horning, D. O., 1965. Closed ecological systems. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, Volume 91, pp. 23-48.

Preu, P. & Braun, M., 2014. German SIMBOX on Chinese mission Shenzhou-8: Europe's first bilateral cooperation utilizing China's Shenzhou programme. *Acta Astronautica*, Volume 94, pp. 584-591.

Quantius, D. et al., 2014. Initial design of laboratories for sustainable habitation. *Acta Astronautica*, Volume 94, pp. 541-562.

Skoog, A. I., 2013. Life support systems. In: C. Norberg, ed. *Human Spaceflight and Exploration*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 161-207.

Wu, R. & Wang, Y., 2015. Psychosocial interaction during a 105-day isolated mission in Lunar Palace 1. *Acta Astronautica*, Volume 113, pp. 1-7.

Κεφάλαιο 4: Επίγειες Εφαρμογές των Τεχνολογιών Υποστήριξης Ζωής

4.1 Διαστημικές τεχνολογίες για την Αειφορία

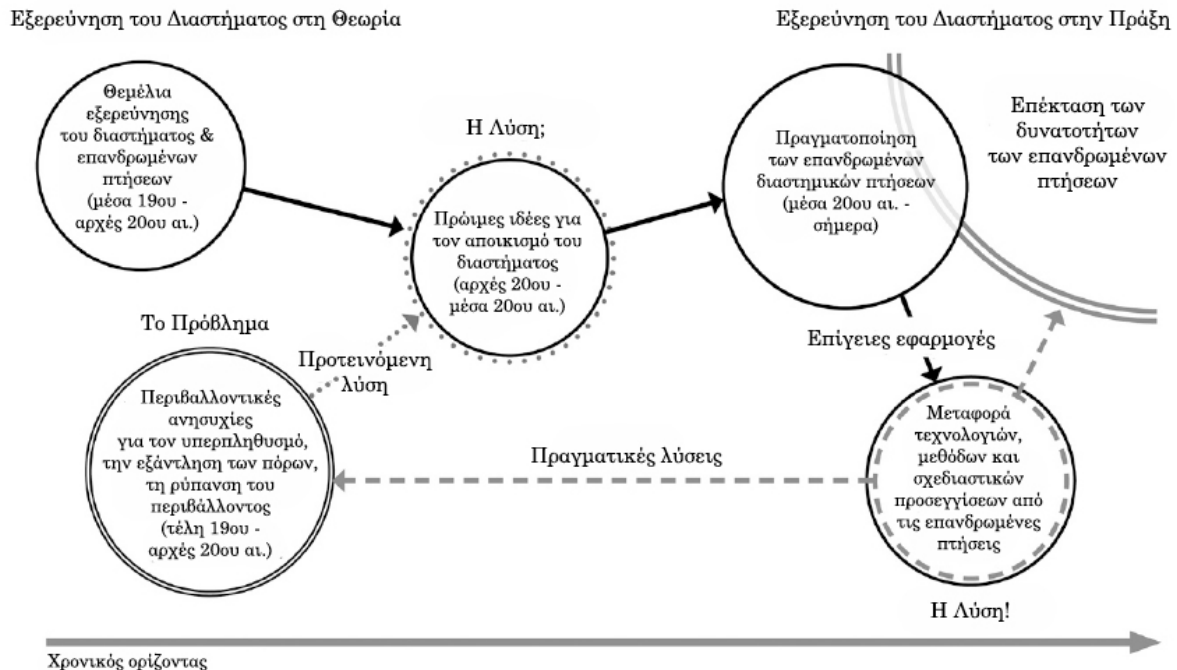
Σύμφωνα με τον Olla (2009), δύο από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του 21^{ου} αιώνα είναι η αλματώδης εξέλιξη της διαστημικής τεχνολογίας και η επιτακτική ανάγκη υλοποίησης των πρακτικών της αειφόρου ανάπτυξης, η οποία ανακύπτει εξαιτίας της περιπλοκότητας και της επιμονής των προβλημάτων βιωσιμότητας που εμφανίζουν τα υπάρχοντα αναπτυξιακά μοντέλα. Κατά τη γνώμη του, η μόνη εφικτή τακτική αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων είναι η εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών με την υποστήριξη υποδομών διαστημικής τεχνολογίας (Olla, 2009). Τη σημαντική συνεισφορά της διαστημικής τεχνολογίας στην επίτευξη των στόχων της αειφόρου ανάπτυξης έχουν, βεβαίως, υπογραμμίσει και διεθνείς οργανισμοί που εποπτεύουν τις αναπτυξιακές πολιτικές ανά τον κόσμο (WEF, 2015) (UNCSD, 2012), καθώς και οργανισμοί που εμπλέκονται άμεσα με τον τομέα του διαστήματος (SpaceFoundation, 2009) (ESA, 2013).

Οι αξιόλογες πληροφορίες που εξάγονται από τα γεωχωρικά δεδομένα και τις τηλεπισκοπικές εικόνες που συλλέγονται χάρη στους δορυφόρους παρατήρησης της Γης έχουν ήδη αποδείξει την καίρια χρησιμότητα της διαστημικής τεχνολογίας σε μια πληθώρα υποτομέων της αειφόρου ανάπτυξης, όπως είναι, για παράδειγμα, η προστασία του περιβάλλοντος, η διαχείριση ενέργειας, η ασφάλεια της αγροδιατροφικής παραγωγής, η ανεύρεση και η αξιοποίηση φυσικών πόρων, η καταπολέμηση της κοινωνικής ανισότητας και η αντιμετώπιση των φυσικών καταστροφών (Arevalo Yepes & Arevalo Botero, 2013) (Schrogl, et al., 2009).

Μάλιστα, η αναγνωρισμένη αξία αυτών των πληροφοριών έχει οδηγήσει στην πρόταση και τον σχεδιασμό σταδιακής υιοθέτησης διαστημικών τεχνολογιών και στρατηγικής επένδυσης σε διαστημικές υποδομές από αναπτυσσόμενα κράτη της Αφρικής, της Ασίας και της Λατινικής Αμερικής, τα οποία έχουν μικρή ή μηδενική προηγούμενη επαφή με τις επιστήμες και τις τεχνολογίες του διαστήματος, με στόχο την επιτάχυνση της ανάπτυξής τους στο πλαίσιο της αειφορίας (Rochon, 2009) (Waswa & Juma, 2012) (Raghebendra, 2006) (Ojo, 2010) (Ratanavong, 2000).

Ωστόσο, σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις και εφαρμογές δίνεται έμφαση στην αξιοποίηση ενός μόνο μέρους των διαστημικών τεχνολογιών: στα δορυφορικά συστήματα συλλογής δεδομένων. Σύμφωνα με την Tkatchova, όμως, η επιπρόσθετη αξιοποίηση για επίγεια χρήση των τεχνολογιών που αναπτύσσονται για τις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις και για τις εξερευνητικές διαστημικές αποστολές -π.χ. των τεχνολογιών των συστημάτων υποστήριξης ζωής- δύναται να αποφέρει σημαντικά οικονομικά και κοινωνικά οφέλη, τόσο στον δημόσιο όσο και στον ιδιωτικό τομέα

(Tkatchova, 2011). Η χρησιμότητα της αξιοποίησης αυτών των τεχνολογιών, των διαδικασιών και των συστημάτων προς όφελος, συγκεκριμένα, της αειφόρου ανάπτυξης μόλις πρόσφατα διερευνήθηκε και επιβεβαιώθηκε -μέσα από συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης- στους υποτομείς της διαχείρισης ενέργειας, της διαχείρισης νερού, της διαχείρισης αποβλήτων και της διατήρησης του τοπικού περιβάλλοντος (Castiglioni, et al., 2015).



Σχήμα 4. 1: Μεταφορά τεχνολογίας μεταξύ διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής και επείγουσ εφαρμογών με την πάροδο του χρόνου. Προσαρμογή από (Boy & Doule, 2014)

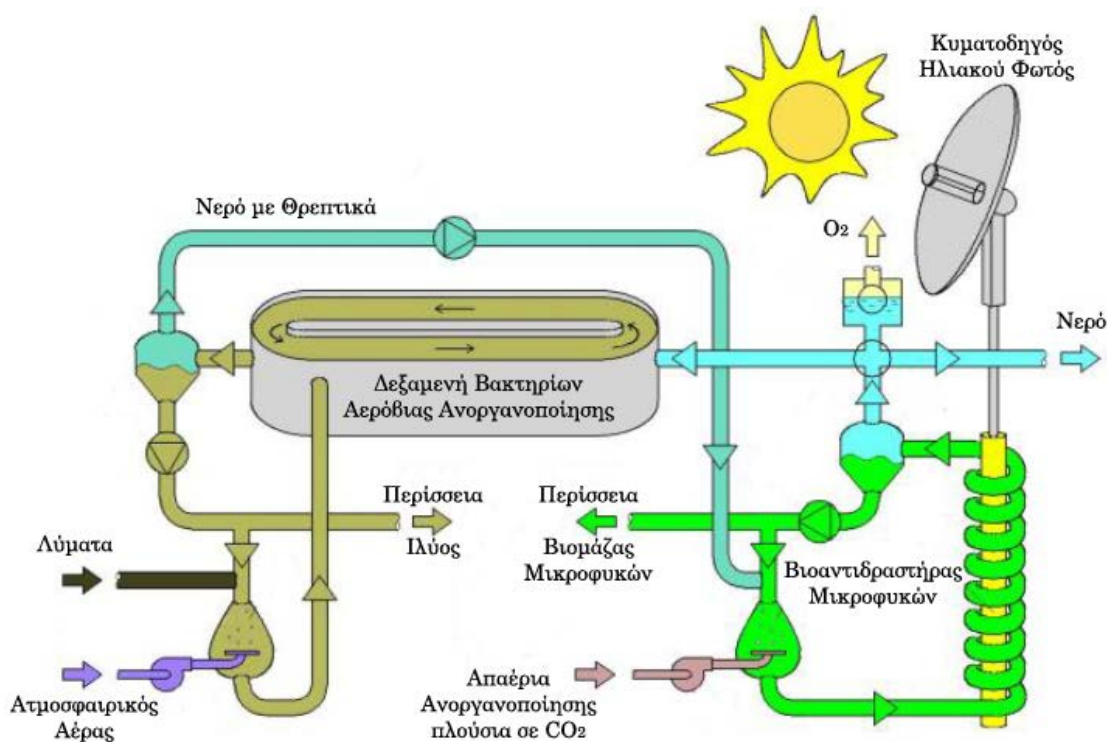
Φαίνεται, δηλαδή, πως η καινοτομική μεταφορά τεχνολογίας από τον τομέα του διαστήματος σε επίγειες εφαρμογές μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στην επίτευξη των στόχων της αειφορίας, πολλώ δε μάλλον αν αναλογιστεί κανείς τον συχνά ρηξικέλευθο χαρακτήρα των διαστημικών τεχνολογιών (Van der Veen, et al., 2012). Πιο συγκεκριμένα, το ζήτημα της υποστήριξης ζωής ενός πληρώματος σε μια διαστημική βάση ή σε έναν διαστημικό σταθμό φαίνεται πως έχει αρκετές ομοιότητες με το ζήτημα της αειφόρου διαχείρισης πόρων στη Γη: οι δύο βασικές διαφορές τους είναι οι τεράστιες αποθεματικές χωρητικότητες και η μεγάλη βιοποικιλότητα που χαρακτηρίζουν αποκλειστικά τη γήινη βιόσφαιρα. Έτσι, χάρη στη μικρή τους κλίμακα, τα συστήματα υποστήριξης ζωής στο διάστημα υποδεικνύουν με τον πιο άμεσο τρόπο τα κρίσιμα προβλήματα που μπορούν να ανακύψουν από την αλόγιστη διαχείριση των πόρων. Καθώς ο πληθυσμός της Γης διογκώνεται, και η συγκέντρωση των ανθρώπων στις πόλεις αυξάνεται διαρκώς, κρίνεται σχεδόν επιτακτική η ανάγκη τροποποίησης και επιστράτευσης των υφιστάμενων τεχνολογιών εξυγίανσης της ατμόσφαιρας και του νερού, παραγωγής τροφής και διαχείρισης αποβλήτων που έχουν σχεδιαστεί ή αναπτυχθεί για το διάστημα. Εκτός αυτού, όμως, ανακύπτει και η ευκαιρία της συνεργατικής και διεπιστημονικής ανάπτυξης νέων αντίστοιχων

τεχνολογιών που θα έχουν εξ' αρχής διττή χρήση: από τη μία, την υποστήριξη ζωής κλειστού κύκλου των πληρωμάτων που θα συμμετέχουν στις μελλοντικές μακροχρόνιες διαστημικές πτήσεις και, από την άλλη, τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων στη Γη, τόσο στα διαρκώς μεγεθυνόμενα αστικά κέντρα όσο και στις φτωχές και άγονες περιοχές, όπως είναι, για παράδειγμα, τα νησιά. Στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζεται διαγραμματικά αυτή η στενή σχέση των διαδικασιών ανάπτυξης τεχνολογίας τόσο για τα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής όσο και για την αειφόρο ανάπτυξη στη Γη. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, λοιπόν, θα παρουσιαστούν οι διάφορες προοπτικές εφαρμογών των τεχνολογιών υποστήριξης ζωής τόσο στο οικιστικό περιβάλλον όσο και σε ακραία περιβάλλοντα, όπως έχουν προταθεί από τους ερευνητές στην επιστημονική βιβλιογραφία (Belz & Henn, 2014) (Burnett, 2012) (Boy & Doule, 2014).

4.2 Προοπτικές εφαρμογών στο Οικιστικό Περιβάλλον

Η ταχεία μεγέθυνση των σύγχρονων μεγαπόλεων, και γενικότερα του αστικού ιστού, έχει ως αποτέλεσμα τη διόγκωση του περιβαλλοντικού τους αντίκτυπου. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που δημιουργεί το οικιστικό περιβάλλον είναι, βεβαίως, η επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Οι παραδοσιακές υποδομές των υπονόμων και των εγκαταστάσεων βιολογικού καθαρισμού λυμάτων έχουν συχνά υψηλό κόστος και καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις γης· περιστασιακά, παρατηρείται και το εξαιρετικά ρυπαντικό φαινόμενο της απόρριψης λυμάτων απευθείας στο υδατικό περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, αντλώντας από τα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, οι ερευνητές έχουν προτείνει την κατασκευή τοπικών εγκαταστάσεων βιολογικής επεξεργασίας αστικών λυμάτων μικρού όγκου, οι οποίες θα μπορούν να εξυπηρετούν μερικώς τις ανάγκες περίπου τριάντα ανθρώπων μιας πολυκατοικίας σε καθαρό νερό, οξυγόνο και ενέργεια -μέσω της παραγόμενης βιομάζας-. Η προτεινόμενη διάταξη βασίζεται στα πρώιμα τεχνητά οικοσυστήματα ανθρώπου-μικροφυκών που αναφέρθηκαν και στο **Κεφάλαιο 3**. Το σύστημα αναμένεται να λειτουργεί ως εξής: τα λύματα εισέρχονται μαζί με ατμοσφαιρικό αέρα πλούσιο σε οξυγόνο σε μια δεξαμενή ανοργανοποίησης που περιέχει αερόβια βακτήρια· χάρη σε μία διάταξη αντλιών, τα λύματα κυκλοφορούνται μέσα στη δεξαμενή και αερίζονται διαρκώς, προκειμένου να οξειδωθούν· τα απαέρια που παράγονται από την οξείδωση -κυρίως CO₂- προωθούνται, έπειτα, σε έναν βιοαντιδραστήρα μικροφυκών, μαζί με ποσότητα νερού πλούσιου σε θρεπτικά που διαχωρίζεται μηχανικά από το παραγόμενο ίζημα ιλύος, ενώ η περίσσεια ιλύος απομακρύνεται και αποθηκεύεται για περαιτέρω διαχείριση· εντός του βιοαντιδραστήρα, τα μικροφύκη φωτοσυνθέτουν με βάση το εισερχόμενο CO₂, τα ανόργανα θρεπτικά και το νερό, χάρη σε έναν ηλιακό κυματοδηγό που διανέμει το ηλιακό φως μέσα στη διάταξη· έπειτα, η περίσσεια νερού,

βιομάζας μικροφυκών και οξυγόνου αφαιρείται από τον βιοαντιδραστήρα με μηχανικό τρόπο· τέλος, το παραγόμενο νερό μπορεί να προχωρήσει στο στάδιο της μετεπεξεργασίας, το οξυγόνο μπορεί να διοχετευθεί στον ατμοσφαιρικό αέρα και η βιομάζα των μικροφυκών μπορεί να αποξηρανθεί και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμη ύλη. Αξίζει να σημειωθεί πως το όλο σύστημα σχεδιάζεται με τέτοιον τρόπο ώστε να είναι εφικτό να ενσωματωθεί σαν αρθρωτή πλατφόρμα σε ένα αστικό κτήριο, μια πολυκατοικία, ένα συγκρότημα γραφείων ή έναν ουρανοξύστη, αντιμετωπίζοντας έτσι το πρόβλημα της συμβατότητας μιας μεγαπόλεως με τη γήινη βιόσφαιρα με τρόπο αποκεντρωμένο και στην πηγή του. Ένα πρώιμο σχέδιο αυτής της διάταξης φαίνεται στο **Σχήμα 4.2** (Buzalo, et al., 2014) (Buzalo, et al., 2014).



Σχήμα 4. 2: Διάταξη επεξεργασίας αστικών λυμάτων μικρού όγκου με τη χρήση βιοαντιδραστήρα μικροφυκών. Προσαρμογή από (Buzalo, et al., 2014)

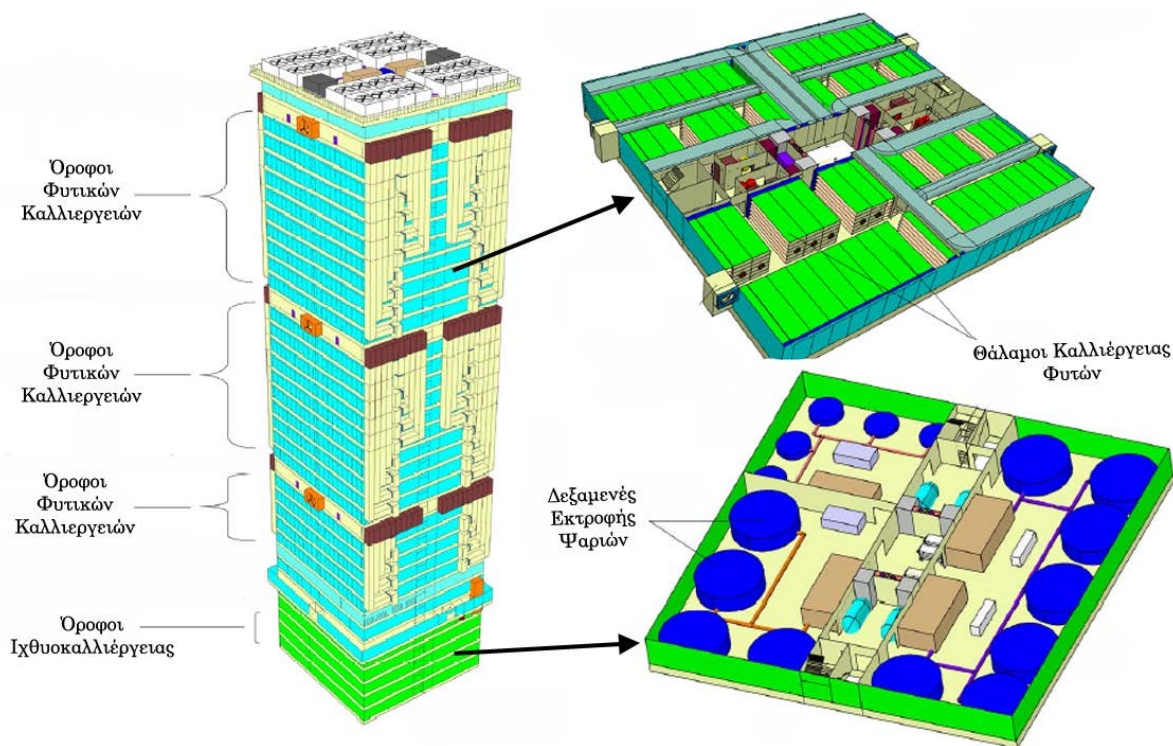
Εκτός από το πρόβλημα των υγρών μεταβολικών αποβλήτων, όμως, στο οποίο εστιάζει το προηγούμενο σύστημα, ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα του οικιστικού περιβάλλοντος μπορεί να αντιμετωπισθεί ικανοποιητικά με την αξιοποίηση των κατάλληλων τεχνολογιών των τεχνητών κλειστών οικοσυστημάτων: το σύνδρομο του άρρωστου κτηρίου (*sick building syndrome*). Το πρόβλημα αυτό προκύπτει ως εξής: εξαιτίας της ανάγκης μείωσης των θερμικών απωλειών ενός κτηρίου, καταβάλλεται έντονη προσπάθεια να συρρικνωθούν ή και να εξαφανιστούν εντελώς πιθανά ανοίγματα στο κτηριακό κέλυφος. Έτσι, τα κτήρια σφραγίζονται όλο και

περισσότερο, και περιορίζεται η επικοινωνία της εσωτερικής τους ατμόσφαιρας με την εξωτερική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα εντός των κτηρίων, γεγονός το οποίο επιβαρύνει την υγεία των ανθρώπων που εργάζονται και ζουν σε αυτά κατά το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους. Γι' αυτό, οι ερευνητές, εμπνεόμενοι από τα αεροστεγώς σφραγισμένα συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, διερεύνησαν τη δυνατότητα εξυγίανσης της ατμόσφαιρας, δίχως την ανάγκη ανανέωσής της με ποσότητες φρέσκου αέρα από το περιβάλλον που θα επιβάρυναν το κτήριο ενεργειακά. Δύο τεχνικές έχουν προταθεί για αυτόν τον σκοπό: η φυσικοχημική διεργασία Sabatier και ο βιολογικός αντιδραστήρας χωμάτινου υποστρώματος (soil bed reactor). Η φυσικοχημική διεργασία Sabatier, που παρουσιάστηκε και στο **Κεφάλαιο 2**, δύναται να συνθέσει μεθάνιο και νερό μέσω της αναγωγικής αντίδρασης του CO₂, που εκπνέεται από τους ανθρώπους, με αέριο H₂. Η αντίδραση είναι εξώθερμη, επομένως θα μπορούσε να συνεισφέρει ενεργειακά στη θέρμανση του κτηρίου. Το παραγόμενο μεθάνιο μπορεί να αποθηκευθεί για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, ενώ το νερό μπορεί να προωθηθεί στο σύστημα ύδρευσης του κτηρίου. Στην περίπτωση, μάλιστα, που το απαιτούμενο H₂ παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το κτήριο δεν επιβαρύνεται ενεργειακά από την όλη διαδικασία. Ο βιολογικός αντιδραστήρας χωμάτινου υποστρώματος (soil bed reactor), από την άλλη, βασίστηκε στην τεχνογνωσία που αποκτήθηκε κατά την κατασκευή και λειτουργία της Βιόσφαιρας 2, που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 3**. Η διάταξη αυτή λειτουργεί ως εξής: ο ατμοσφαιρικός αέρας εισπιέζεται με μηχανικό τρόπο μέσα από ένα υπόστρωμα χώματος που φιλοξενεί ζωντανά φυτά και μικροοργανισμούς, το οποίο μπορεί παράλληλα να χρησιμοποιείται κανονικά για αγροτική καλλιέργεια φυτικής βιομάζας· καθώς ο αέρας διασχίζει το χώμα για να επανέλθει στην ατμόσφαιρα, οι αέριοι ρύποι που εμπεριέχει παρακρατούνται από τους κόκκους, διασπώνται χημικά και χρησιμοποιούνται από τα φυτά και τους μικροοργανισμούς. Με αυτήν τη μέθοδο είναι δυνατόν να απομακρυνθούν από την ατμόσφαιρα πάνω από εξήντα οργανικές ενώσεις, ενώ παράλληλα τα φυτά μπορούν να δεσμεύσουν και το CO₂ μέσω της φωτοσύνθεσης. Μια μικρή εκδοχή του αντιδραστήρα χωμάτινου υποστρώματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να εξυγιανθεί ο αέρας στο εσωτερικό ενός σπιτιού ή ενός γραφείου (Gitelson & Lisovsky, 2008) (Bourrelle, et al., 2010) (Nelson, et al., 2003) (Eckart, 1996).

Βεβαίως, πέρα από τα ζητήματα εξυγίανσης νερού και ατμόσφαιρας στο αστικό περιβάλλον, με τα οποία καταπιάνονται οι τεχνολογικές προτάσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το κλείσιμο του κύκλου της τροφής μέσω της ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων από τα οργανικά απόβλητα φαίνεται πως μπορεί επίσης να υποβοηθηθεί σημαντικά από την τεχνογνωσία των διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής. Προς αυτήν την κατεύθυνση, αξιοποιώντας την έρευνα που διεξήχθη στο πλαίσιο του τεχνητού κλειστού οικοσυστήματος FLaSH που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 3**, οι ερευνητές

έχουν σχεδιάσει μια αστική μονάδα κάθετης καλλιέργειας ανώτερων φυτών και ψαριών που θα μπορεί να εξυπηρετεί τις διατροφικές ανάγκες ενός αστικού πληθυσμού, παράγοντας 13300kg βρώσιμης βιομάζας φυτών και 280kg ψαριών ανά ημέρα. Η μονάδα αυτή, που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.3**, είναι ένα ολόκληρο κτήριο ύψους 167.5m -τριάντα επτά ορόφων- και αποτελείται από τις εξής επιμέρους εγκαταστάσεις: έναν όροφο ελεγχόμενης βλάστησης των σπόρων, στον οποίο εμπεριέχεται και ο εξοπλισμός καθαρισμού και αποστείρωσης που προστατεύει τις καλλιέργειες από τους διάφορους μολυσματικούς παράγοντες· είκοσι πέντε ορόφους καλλιέργειας φυτών, στους οποίους αναπτύσσονται δέκα διαφορετικά είδη βρώσιμων φυτών -μαρούλι, λάχανο, σπανάκι, καρότα, ραδίκια, ντομάτες, πιπεριές, αρακάς και φράουλες- με τη χρήση εξελιγμένων τεχνικών αεροπονίας και τεχνητού φωτισμού LED· τρεις ορόφους ιχθυοκαλλιέργειας με πλήρη ανακύκλωση νερού, όπου εκτρέφονται ψάρια από τα διάφορα είδη της φυλής *Tilapiini* με την αξιοποίηση ενός μέρους της μη βρώσιμης βιομάζας των φυτών σε συνδυασμό με εξειδικευμένες τροφές· έναν όροφο διανομής των θρεπτικών συστατικών, όπου το νερό αναμιγνύεται με τις κατάλληλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών, ψύχεται ή θερμαίνεται και προωθείται στις καλλιέργειες των φυτών· τρεις ορόφους περιβαλλοντικού ελέγχου, όπου ρυθμίζεται η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα προκειμένου να καταστεί κατάλληλος για διοχέτευση στις καλλιέργειες των φυτών· έναν όροφο επεξεργασίας τροφίμων, όπου οι συγκομιδές των φυτών και των ψαριών καθαρίζονται από τα μη βρώσιμα τμήματα της βιομάζας τους και συσκευάζονται για να οδηγηθούν προς πώληση· έναν όροφο, το ισόγειο, που λειτουργεί ως πρατήριο για την πώληση των παραγόμενων προϊόντων και περιλαμβάνει επίσης ένα δωμάτιο ελέγχου που παρακολουθεί την κατάσταση όλου του κτηρίου· και, τέλος, δύο ορόφους διαχείρισης αποβλήτων, όπου ένα μέρος από τα μεταβολικά απόβλητα των ψαριών και τη μη βρώσιμη βιομάζα από τις συγκομιδές υφίσταται αναερόβια χώνευση σε βιοαέριο, ενώ ένα άλλο μέρος τους οδηγείται σε εξειδικευμένους αντιδραστήρες για να μετατραπεί, με τη βοήθεια σωματιδίων από ηφαιστειακά πετρώματα, σε θρεπτικά συστατικά. Αξίζει να σημειωθεί πως τα ανακτώμενα θρεπτικά συστατικά αποθηκεύονται σε δεξαμενές, μαζί με το νερό που επίσης ανακτάται από τα απόβλητα, ώστε να τροφοδοτήσουν αργότερα τις αεροπονικές καλλιέργειες των φυτών. Το βιοαέριο διαχωρίζεται εντός της εγκατάστασης σε μεθάνιο, που αποθηκεύεται ώσπου να οδηγηθεί σε καύση για ηλεκτροπαραγωγή, και σε CO₂, που αποθηκεύεται για να τροφοδοτήσει την ανάπτυξη των φυτών στις καλλιέργειες. Οφείλουμε, φυσικά, να αναφέρουμε και μία ακόμη πρόταση που έχει διατυπωθεί και αφορά στη θερμοχημική μετατροπή των αποβλήτων σε συνθετικό αέριο, το οποίο μπορεί να ωφελήσει τόσο μια μελλοντική πλανητική βάση ή έναν διαστημικό σταθμό όσο και μια επίγεια φάρμα ή ένα χωριό. Το σύστημα αυτό έχει σχεδιαστεί με σκοπό να αξιοποιήσει το μεθάνιο που παράγεται από τη διεργασία Sabatier, μέρος του CO₂ που εκπνέει το πλήρωμα, το υδρογόνο από την ηλεκτρόλυση του νερού για την παραγωγή

οξυγόνου και τα στερεά και ημίρρευστα μεταβολικά απόβλητα των αστροναυτών στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, προκειμένου να τα μετατρέψει είτε σε καθαρό συνθετικό αέριο είτε σε συνθετικό αέριο με υπόλειμμα βιο-άνθρακα (biochar)· έπειτα, το συνθετικό αέριο μπορεί να οδηγηθεί σε καύση για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας ή σε περαιτέρω επεξεργασία για τη μετατροπή του σε αιθανόλη, ενώ ο βιο-άνθρακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα σε πιθανές καλλιέργειες ανώτερων φυτών. Αυτή η τεχνολογία είναι η πρώτη που αναπτύσσεται παράλληλα τόσο για διαστημική όσο και για επίγεια εφαρμογή και εκτιμάται πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φάρμες ή χωριά, όπου η πρώτη ύλη θα είναι τα οργανικά απόβλητα και η απορριπτόμενη αγροτική βιομάζα, με σκοπό να καλύψει με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας τις ενεργειακές ανάγκες των κατοίκων (Zeidler & Schubert, 2014) (Schubert, 2011).

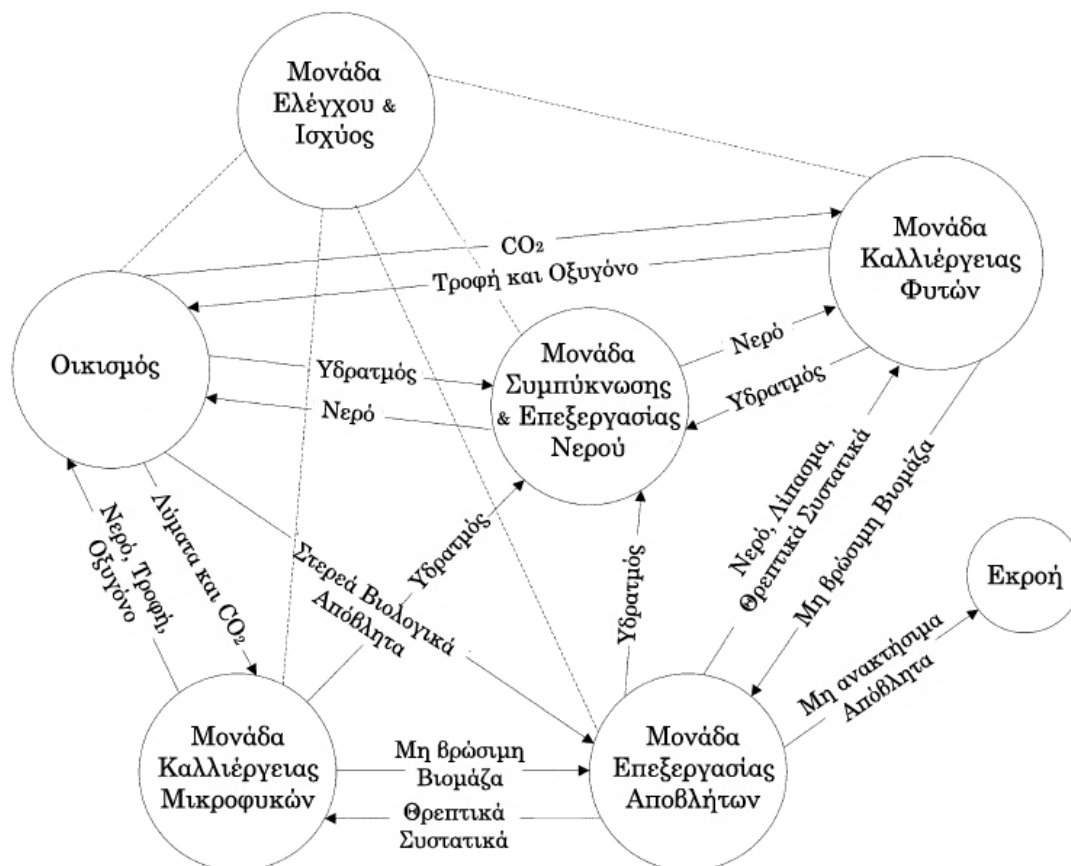


Σχήμα 4. 3: Σχέδιο αστικής μονάδας κάθετης καλλιέργειας -αριστερά- με λεπτομέρειες ορόφων φυτικής καλλιέργειας -δεξιά πάνω- και ιχθυοκαλλιέργειας -δεξιά κάτω-. Προσαρμογή από (Zeidler & Schubert, 2014)

4.3 Προοπτικές εφαρμογών σε Ακραία Περιβάλλοντα

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε πώς η κατάλληλη μεταφορά συγκεκριμένων τεχνολογιών που αναπτύσσονται για τα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου δύναται να συνεισφέρει στη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου του οικιστικού περιβάλλοντος.

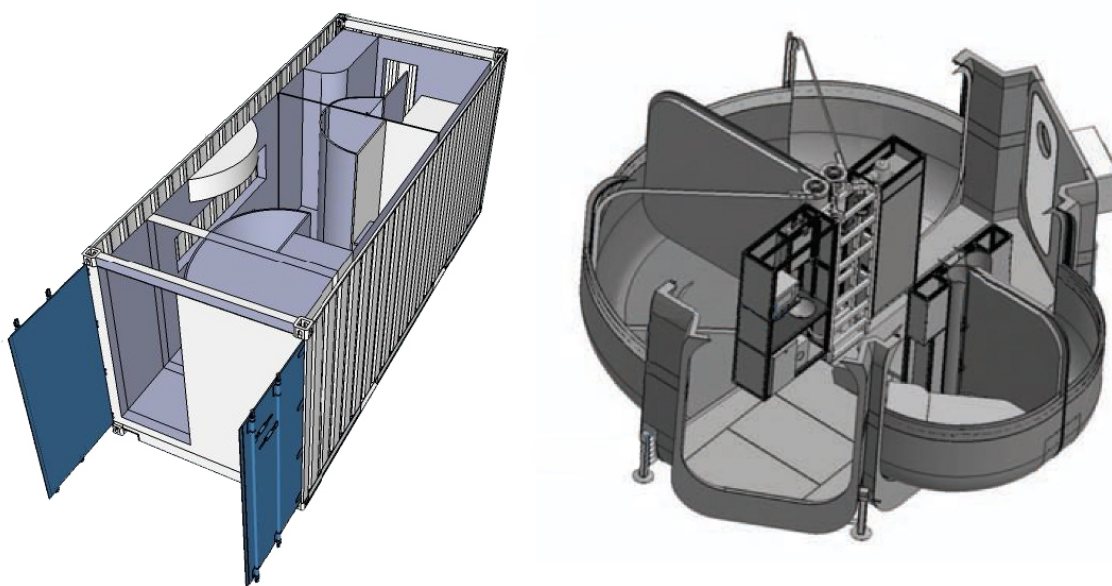
Βέβαια, εκτός από τον διαρκώς μεγεθυνόμενο αστικό ιστό, υπάρχει ένα ακόμη εξίσου σημαντικό πεδίο εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών: τα ακραία περιβάλλοντα· κι αυτό γιατί οι τεχνολογίες υποστήριξης ζωής φαίνεται να μπορούν να επιτρέψουν ή να βελτιώσουν τις συνθήκες διαβίωσης των ανθρώπων στα όρια της γήινης βιόσφαιρας, δηλαδή στις πολικές περιοχές, στις ερήμους, στα βουνά και, ίσως, κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι πολικές περιοχές ήταν το πρώτο περιβάλλον ακραίων συνθηκών που εξετάστηκε ως επίγεια εφαρμογή των συστημάτων που αναπτύσσονταν στο Ίδρυμα Βιοφυσικής (Institute of Biophysics) στο Κρασνογιάρσκ της Σιβηρίας. Ο κύριος στόχος του προγράμματος επίγεια εφαρμογής ήταν η αξιοποίηση των τεχνολογιών του Bios-3, το οποίο παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 3**, έτσι ώστε τα οργανικά απόβλητα μιας οικογένειας πέντε έως επτά ανθρώπων να μπορούσαν να τροφοδοτήσουν την παραγωγή φρέσκων λαχανικών και βατόμουρων κατά τη διάρκεια του σφοδρού αρκτικού χειμώνα και, ίσως, της πολικής νύχτας. Το σύστημα παραγωγής της βιομάζας θα ήταν ενεργειακά διασυνδεδεμένο με τους οικιακούς χώρους, έτσι ώστε να ήταν εφικτό να επιτευχθεί μια διαδοχική αξιοποίηση της απαιτούμενης ενέργειας για τον τεχνητό φωτισμό των καλλιεργειών προς μερική κάλυψη και των θερμικών αναγκών του σπιτιού (Gitelson & Lisovsky, 2008) (Degermendzhi & Tikhomirov, 2014).



Σχήμα 4. 4: Βασική δομή συστήματος υποστήριξης ζωής μερικώς κλειστού κύκλου για έναν ερημικό οικισμό. Προσαρμογή από (Polyakov, et al., 2010)

Οι έρημοι καλύπτουν περίπου το ένα πέμπτο της ξηράς της Γης. Η λειψυδρία και η επιπρόσθετη ερημοποίηση των γόνιμων εδαφών, μάλιστα, είναι πλέον ένα παγκόσμιο πρόβλημα που χρήζει αντιμετώπισης. Προς αυτήν την κατεύθυνση, και δεδομένου ότι τα περιβάλλοντα αυτά χαρακτηρίζονται από συνθήκες ακραίων θερμοκρασιών και ξηρασίας, έλλειψης οργανικών ουσιών και άπλετης ηλιακής ενέργειας και ανόργανων στοιχείων, έχει προταθεί η επιστράτευση των τεχνολογιών των διαστημικών συστημάτων υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου με σκοπό τον σχεδιασμό βιώσιμων ερημικών οικισμών. Αυτός ο σχεδιασμός θα πρέπει, φυσικά, να αντιμετωπίσει με επιτυχία τα εξής κρίσιμα ζητήματα: το πλήρες κλείσιμο του κύκλου του νερού, μέσω της διαπνοής των φυτών· την πλήρη ανακύκλωση των μεταβολικών και βιολογικών αποβλήτων σε θρεπτικά στοιχεία και λίπασμα· την ενίσχυση της παραγωγής βρώσιμης βιομάζας, μέσω ταχέως αναπτυσσόμενων καλλιεργειών ανώτερων φυτών και μικροφυκών· και, τέλος, την κατάλληλη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας τόσο για τη φωτοσύνθεση όσο και για την ψύξη της εγκατάστασης με τη χρήση φωτοβολταϊκών. Οι επίγειες έρημοι έχουν άπλετο ατμοσφαιρικό αέρα, οπότε το κλείσιμο του κύκλου της ατμόσφαιρας δεν είναι τόσο απαραίτητο σε αυτήν την περίπτωση. Έτσι, ένα σύστημα υποστήριξης ζωής για έναν ερημικό οικισμό φαίνεται πως θα είχε τη δομή που παρουσιάζεται διαγραμματικά στο **Σχήμα 4.4**. Κεντρικά στοιχεία αυτού του συστήματος είναι, βεβαίως, οι καλλιέργειες μικροφυκών και ανώτερων φυτών· αναμενόμενο, αν αναλογιστεί κανείς την πολλαπλή χρησιμότητά τους στην αφομοίωση των υγρών αποβλήτων, στην παραγωγή βρώσιμης βιομάζας, στη δέσμευση του CO₂ και στην παραγωγή οξυγόνου και πόσιμου νερού που συζητήθηκαν και στο **Κεφάλαιο 2**. Ως προς την παραγωγή νερού, συγκεκριμένα, που είναι και το μείζον πρόβλημα στα ερημικά περιβάλλοντα, κρίνεται πρωτίστως απαραίτητη η συσσώρευση και συμπύκνωση των υδρατμών που παράγονται κατά τη διαπνοή των ανώτερων φυτών και την εκπνοή των ανθρώπων· η ανάγκη αυτή απαιτεί, βεβαίως, το κλείσιμο της εγκατάστασης με ένα κέλυφος, εν είδει θερμοκηπίου, έτσι ώστε να αποτρέπεται η ανεξέλεγκτη επικοινωνία της εσωτερικής ατμόσφαιρας με την εξωτερική. Κατά δεύτερον, εξαιρετικής σημασίας θα ήταν και η ανάκτηση νερού από τα υγρά και στερεά βιολογικά απόβλητα του οικισμού. Για την κάλυψη αυτής της ανάγκης, οι ερευνητές έχουν προτείνει την αξιοποίηση της τεχνολογίας του τεχνητού υγροτόπου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος της Βιόσφαιρας 2. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί ανώτερα φυτά και υπερθερμοφιλικά βακτήρια που δύνανται να μεταβολίσουν τα υγρά και στερεά βιολογικά απόβλητα του οικισμού με τις ακόλουθες εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις: 85-90% απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων, 75-80% δέσμευση αζώτου και φωσφόρου, παράλληλα με μία μείωση των κολοβακτηρίων κατά 99.8%, χωρίς τη χρήση χημικών. Η επεξεργασία των αποβλήτων στον τεχνητό υγρότοπο ξεκινά με μία αερόβια κομποστοποίηση που γίνεται υπογείως από τα υπερθερμοφιλικά βακτήρια σε θερμοκρασίες 80-100°C, με κινητήριο δύναμη την υψηλή θερμοκρασία της ερήμου. Έπειτα,

οι άλλοι μικροοργανισμοί και τα ανώτερα φυτά που ριζώνουν στον υγρότοπο βοηθούν στον καθαρισμό του νερού και στον εμπλουτισμό του χώματος με λίπασμα και θρεπτικά συστατικά χάρη στον μεταβολισμό τους. Τέλος, το ανακτώμενο νερό από τη διαπνοή των φυτών και τα θρεπτικά συστατικά στο χώμα μπορούν να αξιοποιηθούν στις καλλιέργειες των ανώτερων φυτών και των μικροφυκών για την παραγωγή βρώσιμης βιομάζας. Έχει υπολογιστεί πως αρκούν 4m² τεχνητού υγροτόπου με υπόγεια υπερθερμοφιλική χώνευση για την επεξεργασία των αποβλήτων ενός μονίμου κατοίκου αυτού του οικισμού. Στις καλλιέργειες των φυτών χρησιμοποιείται φυσικός φωτισμός μετά από το κατάλληλο φιλτράρισμα στο κέλυφος της εγκατάστασης που επιτρέπει τη διέλευση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (photosynthetically active radiation, PAR). Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση των καλλιεργειών, θα ήταν εφικτό είτε να διοχετευθεί σε αυτές το CO₂ που εκπνέουν οι κάτοικοι του οικισμού είτε να αντληθεί επιπλέον CO₂ από την εξωτερική ατμόσφαιρα. Η χρήση φωτοβολταϊκών και κατάλληλων συσσωρευτών θεωρείται πως θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες ισχύος για την ψύξη της εγκατάστασης. Τέλος, οφείλουμε να σημειώσουμε πως το σύστημα αυτό θα μπορούσε να είναι μόνο μερικώς κλειστό, καθώς ορισμένες ποσότητες μη ανακτήσιμων αποβλήτων, όπως για παράδειγμα τα άλατα του νατρίου, θα έπρεπε να απομακρύνονται από την εγκατάσταση. Συμπερασματικά, φαίνεται πως η εφαρμογή των κατάλληλων τεχνολογιών υποστήριξης ζωής στην κατασκευή ερημικών οικισμών θα μπορούσε να καθυστερήσει την ανθρωπογενή ερημοποίηση των εδαφών, να αυξήσει τη διαθεσιμότητα νερού και τροφής στις ερήμους, να μειώσει τις μεταναστεύσεις πληθυσμών από τις άγονες περιοχές και να θέσει τα θεμέλια των υποδομών για τη μελλοντική κατοίκηση αυτών των μεγάλων αναξιοποίητων εκτάσεων (Polyakov, et al., 2010) (Wagner, et al., 2015).



Σχήμα 4. 5: Αναπαράσταση εσωτερικών χώρων του ExoHab1 -αριστερά- και του SHEE -δεξιά-. Προσαρμογή από (Schlacht, et al., 2012) (Imhof, et al., 2015)

Τα ακραία περιβάλλοντα, όμως, δεν περιορίζονται μόνο στις πολικές περιοχές και στις ερήμους. Μια ακόμη περίπτωση κατά την οποία το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από ακραίες συνθήκες που δυσχεραίνουν την επιβίωση του ανθρώπου εντός του είναι οι φυσικές καταστροφές· ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς το γεγονός πως ο υπερπληθυσμός έχει αυξήσει σημαντικά την πληθυσμιακή συγκέντρωση σε ευάλωτα περιβάλλοντα. Ένα παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η ρύπανση των υδατικών πόρων εξαιτίας κάποιας φυσικής καταστροφής, η οποία καθιστά το νερό ακατάλληλο για χρήση από τους ανθρώπους. Προκειμένου να υποβοηθήσουν την επιβίωση των ανθρώπων στις ακραίες συνθήκες που επακολουθούν μια φυσική καταστροφή, λοιπόν, οι ερευνητές στράφηκαν και πάλι στα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου. Δύο αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις αναπτύχθηκαν με αυτόν τον τρόπο: το ενδιαίτημα ακραίας λειτουργίας (*extreme operation habitat 1, ExoHab1*) και το αυτο-αναπτυσσόμενο ενδιαίτημα για ακραία περιβάλλοντα (*self-deployable habitat for extreme environments, SHEE*). Το *ExoHab1* -αρχικά με την πρώιμη ονομασία *Mini Hab*- αναπτύχθηκε με σκοπό να παρέχει μια άμεση και ασφαλή λύση στη διαχείριση των περιβαλλοντικών καταστροφών που πλήττουν ανθρώπινους πληθυσμούς. Προκειμένου να είναι εύκολη και γρήγορη η μεταφορά τους σε τέτοιες περιοχές, τα *ExoHabs* έχουν τις διαστάσεις ενός τυποποιημένου κοντέινερ που ακολουθεί το πρότυπο ISO. Στο εσωτερικό τους περιέχονται εγκαταστάσεις μαγειρέματος, ντουζιέρα, τουαλέτα και κρεβάτια, ενώ δίνεται και η δυνατότητα να προστεθούν επιπλέον ένας χώρος γραφείου και ένας χώρος εργαστηρίου· η εσωτερική διαρρύθμισή ενός *ExoHab1* φαίνεται σε τομή στο **Σχήμα 4.5**. Έτσι, το *ExoHab1* μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την υποβοήθηση της επιβίωσης των πληγμένων πληθυσμών είτε ως μια στρατηγική βάση για την επιτόπια ανάπτυξη των κατάλληλων οργανωτικών δράσεων διαχείρισης της εκάστοτε καταστροφής από τις αρμόδιες αρχές και τους ειδικούς επιστήμονες -π.χ. ιατρούς, γεωλόγους, μηχανικούς-. Κεντρικό ρόλο στην αυτάρκεια αυτής της λύσης διαδραματίζει, φυσικά, η φυσικοχημική τεχνολογία κλειστού κύκλου νερού που έχει μεταφερθεί από τα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής. Το δεύτερο αντίστοιχο σύστημα, το *SHEE*, στοχεύει επίσης στην παροχή άμεσης λύσης για τη διαχείριση των περιβαλλοντικών καταστροφών, αλλά διαφέρει από το *ExoHab1* σε ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό: είναι αυτο-αναπτυσσόμενο. Χάρη σε αυτό το σημαντικό του πλεονέκτημα, το *SHEE* μπορεί να μεταφερθεί εύκολα με ένα φορτηγό, καθώς έχει περίπου τις διαστάσεις ενός κοντέινερ, και, μόλις φτάσει στον προορισμό του, να αναπτυχθεί -με τη βοήθεια του ενσωματωμένου ρομποτικού μηχανισμού του- στον διπλάσιο, περίπου, ωφέλιμο όγκο. Έτσι, η λύση αυτή μπορεί να παρέχει εγκαταστάσεις υγιεινής, κουζίνα, ιδιωτικά κρεβάτια, γραφείο και εργαστήριο σε ένα πλήρωμα δύο ατόμων· η εσωτερική διαρρύθμισή ενός *SHEE* φαίνεται σε τομή στο **Σχήμα 4.5**. Βεβαίως, επειδή η λύση αυτή απευθύνεται τόσο στους πληγμένους πληθυσμούς όσο και στους αρμόδιους ειδικούς, οι

εσωτερικοί χώροι καθενός SHEE μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις -π.χ. είναι εφικτή η αντικατάσταση των εργαστηρίων με θερμοκήπια-. Όπως και στην περίπτωση του ExoHab1, το πιο κρίσιμο υποσύστημα του SHEE είναι το σύστημα υποστήριξης ζωής, στο οποίο έχουν αξιοποιηθεί, φυσικά, φυσικοχημικές τεχνολογίες για το κλείσιμο του κύκλου του νερού και της ατμόσφαιρας. Οφείλουμε, τέλος, να σημειώσουμε πως τόσο το ExoHab1 όσο και το SHEE είναι παραδείγματα ανάπτυξης τεχνολογίας διττής χρήσης, καθώς τα υποσυστήματά τους έχουν, μεν, ως κύριο βραχυπρόθεσμο στόχο την υποβοήθηση της επιβίωσης του ανθρώπου σε περιβάλλοντα πληγμένα από κάποια φυσική καταστροφή, όμως ως μακροπρόθεσμο στόχο έχουν τη δοκιμή και την ωρίμανση των συστημάτων υποστήριξης ζωής που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε μελλοντικές πλανητικές βάσεις (Schlacht, et al., 2012) (Schlacht, et al., 2014) (Imhof, et al., 2015) (Doule, et al., 2014).

Συνοψίζοντας τα όσα ειπώθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, μπορούμε να ισχυριστούμε πως η υποστήριξη ζωής ενός πληρώματος σε μια διαστημική βάση είναι, κατά βάση, ένα πρόβλημα διαχείρισης πόρων παρόμοιο με αυτά που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε και στη Γη. Εξαιτίας αυτής της ευθυγράμμισης των στόχων, ανακύπτει μια εξαιρετική ευκαιρία για συνεργατική και διεπιστημονική ανάπτυξη νέων αιεφόρων τεχνολογιών διττής χρήσης: βραχυπρόθεσμα, για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων στη Γη, μέσω της κατάλληλης διαχείρισης πόρων σε αστικά και ακραία περιβάλλοντα και, μακροπρόθεσμα, για την υποστήριξη ζωής κλειστού κύκλου των πληρωμάτων που θα συμμετέχουν στις μελλοντικές, μακροχρόνιες διαστημικές αποστολές. Εν τέλει, ο απώτερος σκοπός είναι και στις δύο περιπτώσεις ο ίδιος: η αιεφόρος ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού είτε αυτός περιοριστεί στη Γη είτε επεκταθεί και σε άλλα ουράνια σώματα.

4.4 Βιβλιογραφία

Arevalo Yepes, C. & Arevalo Botero, M., 2013. Implementing space technology into sustainable development and resilience theory. *OASIS*, Volume 18, pp. 117-128.

Belz, S. & Henn, N., 2014. *Technologies for Humans in Space with Terrestrial Application for Testing in :envihab. Abstract F4.2-23-14*. Moscow, Russia, 40th COSPAR Scientific Assembly, 2-10 August 2014.

Bourrelle, J. S., Gustavsen, A. & Jelle, B. P., 2010. *From Space Habitats to Zero Emission Buildings: Space Borne ZEB Enabling Technologies*. Maastricht, Liege and Aachen,

Proceedings SB10 Euregion: Towards 0-impact buildings and environments, 11-13 October 2010.

Boy, G. & Doule, O., 2014. How can space contribute to a possible socio-technical future on earth?. *Le travail humain*, Volume 77, pp. 281-298.

Burnett, B., 2012. *International space S&T research as an innovation pathway for Earth sustainability*. Waikoloa, Hawai'i Island, USA, Pacific International Space Center for Exploration Systems Conference, 11-15 November 2012.

Buzalo, N., Bock, T. & Bulgakov, A., 2014. Space Technologies of Life Support Systems for the Metropolitan Cities. *Proceedings of the 31th International Symposium for Automation and Robotics in Construction (ISARC), Sydney, Australia* , pp. 142-148.

Buzalo, N. et al., 2014. Mathematical Modeling of Microalgae–mineralization–human Structure within the Environment Regeneration System for the Biosphere Compatible City. *Procedia Engineering*, Volume 85, pp. 84-93.

Castiglioni, A. G. et al., 2015. Spaceship Earth. Space-driven technologies and systems for sustainability on ground. *Acta Astronautica*, Volume 115, pp. 195-205.

Degermendzhi, A. G. & Tikhomirov, A. A. E., 2014. Designing artificial closed land-and space-based ecosystems.. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, Volume 84, pp. 124-130.

Doule, O. et al., 2014. *Self-deployable Habitat for Extreme Environments – Universal Platform for Analog Research*. San Diego, USA, AIAA Space Forum, 4-7 August 2014.

Eckart, P., 1996. Potential Terrestrial Applications Derived from the Development of Life Support Systems. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*. 2nd ed. s.l.:Springer Science+ Business Media Dordrecht, pp. 413-428.

ESA, 2013. *Sustainable Development: 2011-2012 Report*, s.l.: European Space Agency Communications.

Gitelson, I. I. & Lisovsky, G. M., 2008. Creation of closed ecological life support systems: Results, critical problems and potentials. *Journal of Siberian Federal University*, Volume Biology 1, pp. 19-39.

Imhof, B. et al., 2015. *Building the test-bed SHEE—a Self-deployable Habitat for Extreme Environments Lessons learnt and exploitation opportunities for the scientific community*. Pasadena, California, USA, AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition, 31 August - 2 September 2015.

Nelson, M. et al., 2003. Earth applications of closed ecological systems: relevance to the development of sustainability in our global biosphere. *Advances in Space research*, Volume 31, pp. 1649-1655.

Ojo, A. G., 2010. *Space-based Technology for Sustainable National Development*. Istanbul, Turkey: United Nations/Turkey/ESA Workshop on Integrated Space Technology Applications for Socioeconomic Benefits.

Olla, P., ed., 2009. The Diffusion of Information Communication and Space Technology Applications into society. In: *Space Technologies for the Benefit of Human Society and Earth*. Livonia MI, USA: Springer, pp. 413-430.

Polyakov, Y., Musaev, I. & Polyakov, S., 2010. Closed bioregenerative life support systems: Applicability to hot deserts. *Advances in Space Research*, Volume 46, pp. 775-786.

Raghbendra, I. J. ed., 2006. Space Technology for Sustainable Development in Asia. In: *The first ten K R Narayanan orations: essays by eminent persons on the rapidly transforming Indian economy*. Canberra, Australia: ANU E Press, pp. 19-48.

Ratanavong, N., 2000. *Regional Cooperation On Space Applications For Sustainable Development In Asia And The Pacific*. Amsterdam, The Netherlands, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Supplement B6, pp. 23-28.

Rochon, G. L., 2009. Space-based technologies and high performance computing in support of environmental sustainability in developing countries. *Clean Techn Environ Policy*, Volume 11, pp. 251-252.

Schlacht, I. L. et al., 2012. *Extreme Living Solutions: Self-sufficient habitat for extreme environments based on space technology*. Naples, Italy, 63rd International Astronautical Congress, 1-5 October 2012.

Schlacht, I. L. et al., 2014. *Practical design examples for human habitats in space, off-grid, and in low-impact communities*. Toronto, Canada, 65th International Astronautical Congress, 29 September - 3 October 2014.

Schrogl, K.-U., Mathieu, C. & Lukaszczyk, A. eds., 2009. *Threats, Risks and Sustainability - Answers by Space*. Vienna, Austria: Springer- Verlag Wien.

Schubert, P. J., 2011. *Dual Use Technologies for Self-Sufficient Settlements: From the Ground Up*. Huntsville, Alabama, USA, 30th International Space Development Conference (ISDC), 18-22 May 2011.

SpaceFoundation, 2009. *Solutions from Space: Space Applications for International Development*, s.l.: Space Foundation.

Tkatchova, S., 2011. *Space-Based Technologies and Commercialized Development: Economic Implications and Benefits*. Hershey PA, USA: Engineering Science Reference.

UNCSD, 2012. *A/RES/66/288 - The Future We Want*, s.l.: United Nations Conference on Sustainable Development (Rio+20).

Van der Veen, E. J. et al., 2012. Disruptive Space Technologies. *International Journal of Space Technology Management and Innovation*, Volume 2, pp. 24-39.

Wagner, I., Braun, M., Slenzka, K. & Posten, C., 2015. Photobioreactors in Life Support Systems.. In: *Microalgae Biotechnology*. s.l.:Springer International Publishing, pp. 143-184.

Waswa, P. M. & Juma, C., 2012. Establishing a space sector for sustainable development in Kenya. *Int. J. Technology and Globalisation*, Volume 6, pp. 152-169.

WEF, 2015. *Bringing Space Down to Earth*, s.l.: The World Economic Forum's Global Agenda Council on Space Security.

Zeidler, C. & Schubert, D., 2014. *From Bioregenerative Life Support Systems for Space to Vertical Farming on Earth – The 100% Spin-off*. Waterloo, Canada, Life in Space for Life on Earth Symposium, 15-20 June 2014.

Συμπεράσματα και Προτάσεις για το μέλλον

«Ακολουθώντας το φως του Ήλιου, αφήσαμε πίσω μας τον Παλαιό Κόσμο». Αυτή η επιγραφή που έφεραν οι караβέλες του Χριστόφορου Κολόμβου φαίνεται σιγά σιγά να ξαναγίνεται επίκαιρη -μολονότι σε μεγαλύτερη κλίμακα-, χάρη στην ταχεία άνθιση της ειρηνικής αξιοποίησης του διαστήματος που σημειώνεται τα τελευταία χρόνια. Βεβαίως, το διαστημικό περιβάλλον είναι γενικά εχθρικό απέναντι στον τεχνολογικό εξοπλισμό, πολλώ δε μάλλον απέναντι στους αστροναύτες. Για τον λόγο αυτό, η επιβίωση του ανθρώπου στο διάστημα εξαρτάται απόλυτα από τα συστήματα υποστήριξης ζωής: τα συστήματα, δηλαδή, που είναι επιφορτισμένα με το να παρέχουν στο πλήρωμα ένα ελεγχόμενο, διατηρήσιμο και φυσιολογικά αποδεκτό περιβάλλον, μακριά από τη Γη. Ένας από τους πιο κρίσιμους τομείς των αρμοδιοτήτων αυτών των συστημάτων είναι, φυσικά, και ο τομέας διαχείρισης πόρων, ο οποίος περιλαμβάνει τις λειτουργίες παροχής οξυγόνου, παροχής νερού, παροχής τροφής και διαχείρισης αποβλήτων. Έτσι, με γνώμονα τη μέθοδο διαχείρισης αυτών των πόρων, τα συστήματα υποστήριξης ζωής διακρίνονται σε συστήματα ανοιχτού κύκλου και σε συστήματα κλειστού κύκλου. Εξαιτίας του μεγάλου κόστους ανεφοδιασμού του πληρώματος με νέους πόρους, γίνεται εύκολα κατανοητό πως η μέθοδος κλειστού κύκλου είναι η επικρατέστερη στις περιπτώσεις των επανδρωμένων διαστημικών αποστολών μεγάλης διάρκειας.

Για το κλείσιμο των κύκλων του νερού, του αέρα και της τροφής μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας των στερεών, υγρών και αέριων αποβλήτων, υπάρχουν, λοιπόν, δύο κατηγορίες μεθόδων και τεχνικών: οι φυσικοχημικές και οι βιολογικές. Τόσο οι μεν όσο και οι δε έχουν διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και ποικίλα επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητας. Γι' αυτό, συνίσταται ο προσεκτικός συνδυασμός των κατάλληλων τεχνολογιών από αυτές τις δύο οικογένειες με σκοπό τον σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου, τα οποία θα εμφανίζουν σαφώς βελτιωμένα χαρακτηριστικά από τα αμιγώς φυσικοχημικά ή τα αμιγώς βιολογικά. Εξάλλου, με την έναρξη της Ανθρωπόκαινου Εποχής, ακόμη και η γήινη βιόσφαιρα δεν είναι πλέον αμιγώς φυσική, αλλά αποτελεί εν μέρει δημιούργημα του συνόλου της ανθρώπινης τεχνολογικής δραστηριότητας. Μάλιστα, οι ομοιότητες της γήινης βιόσφαιρας με τα συστήματα υποστήριξης ζωής δεν περιορίζονται μόνο στον αναπόφευκτο υβριδικό τους χαρακτήρα. Καθώς τα υβριδικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου είναι στην πραγματικότητα τεχνητά κλειστά οικοσυστήματα, έλεται ότι οι βασικές αρχές της ανακύκλωσης της ύλης που διέπουν τη γήινη βιόσφαιρα θα μπορούσαν να διερευνηθούν πειραματικά εντός μιας τέτοιας εγκατάστασης. Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν ήδη κινηθεί η Ευρώπη, οι ΗΠΑ, η Ρωσία, η Ιαπωνία και η Κίνα, με πειραματικές εγκαταστάσεις που αποσκοπούν τόσο στη μελέτη αυτών των αρχών της οικολογίας όσο και στην ανάπτυξη και ωρίμανση των κατάλληλων τεχνολογιών για τα διαστημικά συστήματα υποστήριξης ζωής κλειστού κύκλου.

Παράλληλα, όμως, με τους αυστηρώς ερευνητικούς στόχους που υπάγονται στους τομείς της οικολογίας και της αστροναυτικής, οι ειδικοί που εργάζονται σε αυτά τα πειραματικά τεχνητά οικοσυστήματα έχουν τονίσει ιδιαίτερα και τις προοπτικές των πρακτικών επίγειων εφαρμογών των τεχνολογιών που δοκιμάζουν και αναπτύσσουν. Κι αυτό γιατί ο απώτερος στόχος της λειτουργίας αυτών των συστημάτων είναι κατά βάση η αειφορία. Αν και ως τώρα η σχέση αειφόρου ανάπτυξης και διαστημικής τεχνολογίας είχε συζητηθεί μόνο υπό το πρίσμα της αξιοποίησης των δορυφορικών δεδομένων, εντούτοις μόλις πρόσφατα ετέθη το ζήτημα της μεταφοράς τεχνολογίας από τα συστήματα υποστήριξης ζωής σε επίγειες εφαρμογές ορθολογικής διαχείρισης πόρων. Δύο βασικοί τομείς επίγειων εφαρμογών που θα μπορούσαν να υποβοηθηθούν αρκετά από μία τέτοια μεταφορά τεχνολογίας είναι οι μεγάλες και τα ακραία περιβάλλοντα. Εκτός από τη μεταφορά τεχνολογίας, όμως, ανακύπτει και μία εξαιρετική ευκαιρία για διεπιστημονική ανάπτυξη νέων αντίστοιχων τεχνολογιών διττής χρήσης: από τη μία, για την υποστήριξη ζωής κλειστού κύκλου των πληρωμάτων στο διάστημα και, από την άλλη, για την αειφόρο διαχείριση πόρων προς όφελος των ανθρώπων στη Γη. Αυτή η δυνατότητα δεν προκύπτει τυχαία είναι απόρροια της βαθύτερης συνταύτισης των δύο χρήσεων αυτών των τεχνολογιών που ανάγονται στον ίδιο απώτερο στόχο: στη διατήρηση του ανθρώπινου πολιτισμού σε ένα ή περισσότερα ουράνια σώματα.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως ο στόχος της αειφόρου διαβίωσης του ανθρώπου στη Γη δεν έρχεται διόλου σε σύγκρουση με την επανδρωμένη εξερεύνηση του διαστήματος, ούτε και με τον πιθανό μελλοντικό αποικισμό του. Επομένως, το ζήτημα της διοχέτευσης κεφαλαίου πρωτίστως στην ανακούφιση των επίγειων προβλημάτων των πληθυσμών -που θεωρούνται κρίσιμης σημασίας- έναντι της διοχέτευσής του στην ενίσχυση της μακροχρόνιας παρουσίας του ανθρώπου στο διάστημα -που θεωρείται δευτερεύουσας σημασίας- είναι, στην πραγματικότητα, ένα ψευδοδίλημμα. Με την κατάλληλη στρατηγική έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης είναι εφικτό να επιτευχθεί μια αποτελεσματική συνέργεια των φορέων που εμπλέκονται σε αυτούς τους δύο τομείς, η οποία θα μπορούσε να αποφέρει καινοτομίες διττού χαρακτήρα, έτοιμες για προσαρμογή τόσο στο περιβάλλον του διαστήματος όσο και σε αυτό της Γης και όλα αυτά στο πλαίσιο του ίδιου επενδυτικού σχεδίου. Παρ' όλο που μία τέτοια συνέργεια φαίνεται εκ πρώτης όψεως αρκετά δύσκολη, θα ήταν ένα αρκετά αξιόλογο και αποτελεσματικό σχέδιο, μιας και δύναται να αποφέρει πολλαπλά υλικά και άυλα οφέλη με σαφώς μειωμένα κόστη έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης. Η χάραξη μιας τέτοιας στρατηγικής θα συναντήσει, πιθανώς, αρκετά εμπόδια. Ένα λατινικό ρητό, όμως, υποδεικνύει λακωνικά τον λαμπρό προορισμό στην άκρη αυτού του δύσβατου δρόμου: «*per aspera ad astra*».