



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Κτήριο Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, 54124  
Θεσσαλονίκη  
τηλ.: 2310 995638 | e-mail: [kungolos@civil.auth.gr](mailto:kungolos@civil.auth.gr)



Χρηματοδοτικό πρόγραμμα  
«ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ & ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ 2023»

**BIOSOIL- Ανάπτυξη και αξιοποίηση μεθόδων εδαφοβελτίωσης με την χρήση βιοστερεών από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων και τεχνικών βιοενίσχυσης στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της επιστήμης των πολιτών**

Βιβλιογραφική ανασκόπηση στα πεδία αιχμής που πραγματεύεται το έργο

## Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων .....	1
1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ.....	3
1.1 Αστικά λύματα .....	3
1.2 Επεξεργασία λυμάτων .....	3
1.3 Επεξεργασία ιλύος.....	3
1.4 Νομοθετικό πλαίσιο αξιοποίησης ιλύος .....	5
1.5 Αξιοποίηση βιοστερεών.....	8
1.6 Οφέλη αξιοποίησης βιοστερεών .....	10
1.7 Επιθυμητά συστατικά στα βιοστερεά .....	10
1.8 Εφαρμογή βιοστερεών για λίπανση εδαφών που προορίζονται για γεωργική χρήση.....	11
2. ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΙΛΥΟΣ ΩΣ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΕΔΑΦΟΓΕΝΩΝ ΦΥΤΟΠΑΘΟΓΟΝΩΝ .....	13
2.1 Μολυσματικές ασθένειες φυτών .....	13
2.2 Καταστολή και αντιμετώπιση των ασθενειών των φυτών με την εφαρμογή κομπόστ.....	13
2.3 Αντιμετώπιση των ασθενειών των φυτών με την εφαρμογή βιοστερεών .....	14
3. ΒΙΟ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ.....	16
3.1 Η μέθοδος της βιο-ενίσχυσης.....	16
3.2 Η τεχνική MICP.....	20
3.3 Πεδία εφαρμογής της βιο-ενίσχυσης .....	22
3.4 Η συμπεριφορά των βιο-ενισχυμένων εδαφών.....	26
3.5 Συσχέτιση της συμπεριφοράς βιο-ενισχυμένων και τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών	28
4. Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΠΟΛΙΤΩΝ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....	30
4.1 Ορισμός, Αρχές, Επίπεδα Συμμετοχής και Προκλήσεις.....	30
4.2 Επίπεδα συμμετοχής .....	31
4.3 Προκλήσεις .....	31
4.4 Παραδείγματα εφαρμογής πρακτικών Επιστήμης των Πολιτών στην μελέτη του εδάφους ή την κυκλική οικονομία .....	32
4.4.1 Ψηφιακή χαρτογράφηση εδάφους με συμμετοχή διαφορετικών ομάδων .....	32
4.4.2 Αξιολόγηση των απαιτήσεων ετήσιων πόρων για τη λειτουργία αστικών λαχανόκηπων στο Ηνωμένο Βασίλειο: μια προσέγγιση με την επιστήμη των πολιτών.....	33
4.4.3 Συμμετοχή και επιβράβευση πολιτών στη διαχείριση βιομάζας. Η περίπτωση της Αθήνας	34
4.4.4 GROW .....	35
4.4.5 Κόμβος Επιστήμης των Πολιτών ΑΠΘ .....	35
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	37



## 1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ

Σήμερα, η ορθολογική διαχείριση των υγρών αποβλήτων κρίνεται απαραίτητη για τη βιώσιμη ανάπτυξη των πόλεων, τη διαφύλαξη της δημόσιας υγείας, την προώθηση της κυκλικής οικονομίας καθώς και για την προστασία του περιβάλλοντος. Εξαιτίας της έντονης πληθυσμιακής αύξησης, της αστικοποίησης και της εξάντλησης των φυσικών πόρων το συγκεκριμένο ζήτημα αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία. Τα αστικά λύματα οδηγούνται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) με σκοπό την επεξεργασία τους και την ασφαλή διάθεση τους σε κάποιον φυσικό αποδέκτη. Κατά την επεξεργασία τους παράγεται ιλύς, η οποία εφόσον κριθεί ασφαλής μετά από την επεξεργασία που υφίσταται, μπορεί να αξιοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό σε γεωργικές καλλιέργειες, συμβάλλοντας στην κυκλική οικονομία και την ανάκτηση πόρων.

### 1.1 Αστικά λύματα

Τα αστικά λύματα αποτελούν υγρά απόβλητα τα οποία προκύπτουν από καθημερινές δραστηριότητες κάλυψης αναγκών και καθαριότητας νοικοκυριών (χώροι υγιεινής, μαγείρεμα, πλύσιμο ρούχων, πλύσιμο οικιακών σκευών κτλ.), γραφείων, ιδρυμάτων, εμπορικών δραστηριοτήτων, βιοτεχνιών, βιομηχανιών κτλ. Βασικό συστατικό αποτελεί το νερό το οποίο περιέχει προσμίξεις ανόργανων και οργανικών ρύπων με αποτέλεσμα να καθίσταται ακατάλληλο για χρήση αλλά και επιβλαβές για τους υδρόβιους οργανισμούς σε υδάτινους αποδέκτες (Μαρκαντωνάτος, 1990; Κούγκολος, 2018).

Τα αστικά λύματα συλλέγονται με το σύστημα αποχέτευσης μια πόλης. Μέσω του συστήματος αυτού συλλέγονται επίσης τα όμβρια, τα υπόγεια και τα επιφανειακά ύδατα. Τα δίκτυα αποχέτευσης διακρίνονται σε παντορροϊκά εάν συλλέγουν τα όμβρια μαζί με τα λύματα (κοινή συλλογή), χωριστικά εάν συλλέγουν σε διαφορετικούς αγωγούς τα λύματα από τα όμβρια, και μερικά χωριστικά (μικτά) εάν συλλέγουν όμβρια σε ορισμένα τμήματα και σε άλλα αποκλειστικά τα λύματα (Τσώνης, 2004; Κούγκολος, 2018).

Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων στοχεύει στην αποτελεσματική διαχείριση των υγρών αποβλήτων (αστικών ή βιομηχανικών), έτσι ώστε αυτά να μπορούν να διατεθούν σε υδάτινους αποδέκτες χωρίς να υφίσταται επιπτώσεις το περιβάλλον. Επίσης, μέσω της επεξεργασίας των λυμάτων, επιδιώκεται η προστασία της δημόσιας υγείας και των φυσικών οικοσυστημάτων καθώς και η αποφυγή της υποβάθμισης υδατικών πόρων (Μαρκαντωνάτος, 1990).

### 1.2 Επεξεργασία λυμάτων

Σε μια ΕΕΛ πραγματοποιείται μια σειρά από φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, με απώτερο στόχο την απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών, την προστασία του περιβάλλοντος και την αξιοποίηση των εκροών. Τα κύρια στάδια μιας ΕΕΛ είναι η πρωτοβάθμια, η δευτεροβάθμια ή βιολογική επεξεργασία, η απολύμανση και η τριτοβάθμια επεξεργασία (Κούγκολος 2018).

Στις μονάδες αυτές εντοπίζονται δυο βασικές γραμμές επεξεργασίας. Η πρώτη αφορά στην απομάκρυνση επιβλαβών ουσιών από την υγρή μάζα των αποβλήτων, ενώ η δεύτερη σχετίζεται με την επεξεργασία της ιλύος και την απομάκρυνση επιβλαβών στοιχείων από αυτήν. Από το κάθε στάδιο επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων (εκτός του σταδίου απολύμανσης) δημιουργούνται στερεά τα οποία θα πρέπει να απομακρύνονται.

### 1.3 Επεξεργασία ιλύος

Βασικό στόχο της επεξεργασίας της ιλύος αποτελεί η ελάττωση του όγκου της, για την μείωση του κόστους επεξεργασίας και διάθεσής της. Αυτό επιτυγχάνεται με την αφυδάτωση και την σταθεροποίησή της, δηλαδή την μετατροπή της σε αδρανή μάζα (βιοστερεά), ώστε η διάθεσή της στο περιβάλλον να μην αποτελεί κίνδυνο. Με βάση την περιεκτικότητα της ιλύος σε νερό, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως πολύ ρευστή (περιεκτικότητα σε νερό άνω του 85%), σχετικά στερεή (περιεκτικότητα σε νερό 60-65%), πλαστική ή χυλώδης (περιεκτικότητα σε νερό 65-75%), κοκκώδης ή ανθεκτικά στερεή (περιεκτικότητα σε νερό 35-40%), ή ξηρή (περιεκτικότητα σε νερό κάτω του 15%)

(Νταρακάς, 2016). Τα βασικά στάδια επεξεργασίας της ιλύος είναι η *πάχυνση* (thickening), η *χώνευση* (digestion) και η *αφυδάτωση* (dewatering) (Μαρκαντωνάτος, 1990; Κούγκολος, 2018).

Η διαδικασία της *πάχυνσης* στοχεύει τόσο στη μείωση του όγκου της ιλύος, με απομάκρυνση μέρους του νερού που περιέχεται σε αυτήν, όσο και στη βελτίωση των χαρακτηριστικών της. Μπορεί να επιτευχθεί μέσω βαρύτητας σε δεξαμενές πάχυνσης, με επίπλευση σε δεξαμενές, και με μηχανικά μέσα. Η πάχυνση βαρύτητας πραγματοποιείται σε δεξαμενές πάχυνσης, παρόμοιες με τις δεξαμενές καθίζησης, έχοντας μικρότερο διάμετρο, μεγαλύτερο βάθος και μεγαλύτερες κλίσεις πυθμένα, στοχεύοντας στη διευκόλυνση της συσσώρευσης και συμπίκνωσης της ιλύος στη χοάνη συλλογής. Η ιλύς εισέρχεται στη δεξαμενή πάχυνσης από κατάλληλη διάταξη, καθιζάνει και συμπυκνώνεται. Στη συνέχεια, με την βοήθεια ειδικού ξέστρου με κατακόρυφες ράβδους, αναδύεται ελαφρά η ιλύς και απελευθερώνονται υγρά και αέρια. Τα υγρά τα οποία αφαιρέθηκαν από την ιλύ υπερχειλίζουν μέσω περιμετρικού υπερχειλιστή και οδηγούνται στην είσοδο της βιολογικής επεξεργασίας της μονάδας. Η διαδικασία της πάχυνσης μέσω επίπλευσης πραγματοποιείται σε δεξαμενές επίπλευσης στην οποία εισέρχεται η ιλύς με πεπιεσμένο αέρα. Στην συγκεκριμένη διαδικασία, η ιλύς αναδύεται στην επιφάνεια μέσω απελευθερωμένων φυσαλίδων αέρα. Στην συνέχεια, συμπυκνώνεται και απομακρύνεται με ειδικές διατάξεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε ιλύ δευτεροβάθμιας καθίζησης (μέθοδος ενεργού ιλύος). Όσον αφορά την πάχυνση με μηχανικά μέσα, οι κύριες μέθοδοι μηχανικών μέσων αποτελούν ο περιστρεφόμενος κύλινδρος και οι ταινίες βαρύτητας. Η συγκεκριμένη διαδικασία ενδείκνυται για βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου. Τέλος, η απόδοση των συγκεκριμένων συστημάτων είναι υψηλότερη συγκριτικά με την πάχυνση βαρύτητας και επίπλευσης (Μαρκαντωνάτος, 1990; Κούγκολος, 2018).

Η διαδικασία της *χώνευσης* έχει ως βασικό στόχο την αποδόμηση των οργανικών ασταθών ενώσεων οι οποίες περιέχονται εντός της ιλύος. Η χώνευση μπορεί να επιτευχθεί είτε με αερόβιες είτε με αναερόβιες συνθήκες σε κλειστές δεξαμενές. Βασικό πλεονέκτημα της αναερόβιας χώνευσης έναντι της αερόβιας αποτελεί η παραγωγή βιοαερίου (μείγμα CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, άλλα αέρια κτλ.) που αποτελεί καύσιμο για την ΕΕΛ. Μέσω της χώνευσης εξουδετερώνονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και οι δυσοσμίες (Κούγκολος, 2018).

Η διαδικασία της *αφυδάτωσης* της ιλύος στοχεύει στη μείωση του όγκου της και αποτελεί μία φυσική διαδικασία διαχωρισμού του υγρού και του στερεού μέρους της λάσπης. Πραγματοποιείται είτε με μηχανικά μέσα, όπως οι ταινιοφιλτρόπρεσσες και οι φυγοκεντρητές, είτε με κλίνες ξήρανσης. Η πιο συνηθισμένη διαδικασία αφυδάτωσης είναι με χρήση ταινιοφιλτρόπρεσσας, όπου ένα μέρος του νερού απομακρύνεται με βαρύτητα και το υπόλοιπο με συμπίεση ανάμεσα στις ταινίες. Ως κατασκευή, η ταινιοφιλτρόπρεσσα αποτελείται από ατέρμονες ιμάντες-ταινίες, μέσω των οποίων διέρχεται και συμπιέζεται η ιλύς. Έτσι, ένα μέρος του υγρού απομακρύνεται μέσω βαρύτητας, ενώ το υπόλοιπο μέρος απομακρύνεται με συμπίεση ανάμεσα στις ταινίες. Το κύριο πλεονέκτημα της ταινιοφιλτρόπρεσσας αποτελεί ο μειωμένος χώρος συγκριτικά με τις κλίνες ξήρανσης και η ελάττωση των περιβαλλοντικών οχλήσεων συγκριτικά με την αφυδάτωση μέσα σε κλειστούς χώρους με σύστημα εξαερισμού ή απόσμησης. Η συγκέντρωση αφυδατωμένης ιλύος μέσω ταινιοφιλτρόπρεσσας μπορεί να είναι έως και 16-20% (Μαρκαντωνάτος, 1990; Κούγκολος, 2018).

Η *κομποστοποίηση* είναι μια ακόμα διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σταθεροποίηση της αφυδατωμένης ιλύος. Ως κομποστοποίηση ορίζεται η βιολογική αποσύνθεση του βιοαποικοδομήσιμου οργανικού μέρους των αποβλήτων, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε κατάσταση επαρκώς σταθερή, για την χωρίς οχλήσεις αποθήκευση και διαχείριση, και για την ασφαλή χρήση στις εφαρμογές εδάφους. Με τον όρο «ελεγχόμενες συνθήκες» νοείται ο διαχωρισμός μεταξύ της κομποστοποίησης και της απλής αποσύνθεσης που μπορεί να υλοποιηθεί σε ανοικτούς χώρους απόρριψης, ενώ με τον όρο «επαρκώς σταθερός» νοείται η προϋπόθεση της αποθήκευσης δίχως οχλήσεις και η ασφαλής διαχείριση (Tchobanoglous & Kreith, 2018). Βασικό στόχο της διαδικασίας της κομποστοποίησης αποτελεί η μετατροπή των ζυμώσιμων στοιχείων των απορριμμάτων σε εδαφοβελτιωτικό λίπασμα με σκοπό την αξιοποίηση του στην γεωργία (μετατροπή ετερογενούς μάζας σε ομογενή). Η κομποστοποίηση μπορεί να αποτελέσει μια μορφή ανακύκλωσης. Βέβαια, στην Ελλάδα η συγκεκριμένη διαδικασία δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη καθώς δεν υπάρχει υψηλή ζήτηση για εδαφοβελτιωτικά που προέρχονται από απορρίμματα (Tchobanoglous & Kreith, 2018).

Όσον αφορά την διαδικασία της, ένας βασικός παράγοντας επιρροής αυτής αποτελεί το επίπεδο υγρασίας, μιας και η ύπαρξη χαμηλής υγρασίας δεν ευνοεί την ανάπτυξη των απαραίτητων μικροοργανισμών για την διαδικασία της ζύμωσης. Η ύπαρξη υψηλών επιπέδων υγρασίας ελαττώνει κατά πολύ τα απαραίτητα επίπεδα οξυγόνου που συμβάλουν στην ζύμωση. Η κατάλληλη υγρασία για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ζύμωσης κυμαίνεται μεταξύ 45-55%, ενώ ως οριακές τιμές μπορούν να θεωρηθούν αυτές με εύρος το 30%-70% (Κούγκολος, 2018). Βασική παράμετρος αποτελεί ο λόγος C/N (αναλογία άνθρακα και αζώτου), με επιθυμητό όριο 25/1. Ορθή λύση αποτελεί η προσθήκη αζώτου, σε απορρίμματα χαμηλής περιεκτικότητας του στοιχείου αυτού, καθώς και άλλων ιχνοστοιχείων (θείο, κάλιο, μαγνήσιο κτλ.). Το pH θα πρέπει να είναι ελαφρώς όξινο, με τιμές μεταξύ 5-7 (Κούγκολος, 2018). Άλλη βασική παράμετρος αποτελεί ο αερισμός, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί μέσω συνεχούς περιστροφής, καθώς και με επιπλέον προσθήκη αέρα μέσω διάτρητων σωλήνων. Να σημειωθεί πως το μείγμα θα πρέπει να φυλάσσεται και να προστατεύεται από βροχοπτώσεις και ισχυρούς ανέμους. Τέλος, η μέγιστη θερμοκρασία για την ανάπτυξη μικροοργανισμών ζύμωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει του 55-60°C (Κούγκολος, 2018). Σύμφωνα με τους Tchobanoglous και Kreith (2018), η κομποστοποίηση αποτελεί μια οικολογική διαδοχή των μικροβιακών πληθυσμών τα οποία εντοπίζονται συνεχώς στα απόβλητα. Η διαδικασία της ζύμωσης οικιακών λυμάτων αποτελείται από τέσσερις επιμέρους φάσεις. Στη πρώτη φάση ή λανθάνουσα φάση ή φάση υστέρησης, οι μικροοργανισμοί αρχίζουν να δημιουργούν αποικίες (αξιοποίηση σακχάρων, αμύλων, απλών κυτταρινών και αμινοξέων τα οποία εντοπίζονται στα απόβλητα) μόλις σταθεροποιηθούν οι συνθήκες κομποστοποίησης. Στη συνέχεια, ακολουθεί η φάση αυξήσεως, γνωστή και ως ενεργός φάση, κατά την οποία η θερμοκρασία αυξάνεται στους 40-45°C, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται μεσόφιλα μικρόβια τα οποία πεθαίνουν. Η τρίτη φάση ή θερμόφιλος φάση ή φάση σταθεροποίησης, αποτελεί μια κατάσταση στην οποία αναπτύσσονται θερμόφιλα μικρόβια τα οποία πεθαίνουν στους 60-70°C. Η τελική φάση ή φάση ωρίμανσης αποτελεί μια κατάσταση στην οποία το εύκολα αποσυντιθέμενο υλικό ελαττώνεται έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του ανθεκτικού υλικού και την πληθυσμιακή ελάττωση των μικροβίων. Επίσης, στο στάδιο της ωρίμανσης αρχίζει η πτώση της θερμοκρασίας έως η τιμή της να ισούται με την θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ η χρονική διάρκεια του συγκεκριμένου σταδίου είναι ανάλογη του υποστρώματος και των λειτουργικών και περιβαλλοντικών συνθηκών (Tchobanoglous & Kreith, 2018).

#### 1.4 Νομοθετικό πλαίσιο αξιοποίησης ιλύος

Η ομαλή λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) μπορεί να πετύχει υψηλή μείωση του οργανικού φορτίου και των στερεών τα οποία περιέχονται στα λύματα, με στόχο την ασφαλή διάθεσή τους σε υδάτινο αποδέκτη (λίμνη, ποτάμι, θάλασσα κτλ.). Κάποια από τα βασικότερα ζητήματα μιας ΕΕΛ αποτελούν η διάθεση στο περιβάλλον και η αξιοποίηση, με τέτοιον τρόπο ώστε να μειώνεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 80568/4225/91 (ΦΕΚ 641Β 7.8.1991), η αξιοποίηση της ιλύος των αστικών λυμάτων σε γεωργικές δραστηριότητες ως λίπασμα, μπορεί να επιτευχθεί υπό την προϋπόθεση της τήρησης όρων και περιορισμών. Στη συγκεκριμένη νομοθεσία αναφέρονται ο οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος και την ιλύ, τα μέτρα και οι διαδικασίες τήρησης των οριακών τιμών, οι μέθοδοι ανάλυσης και δειγματοληψίας, οι απαγορεύσεις χρήσης της ιλύος, οι υποχρεώσεις των παραγωγών ιλύος καθώς και οι νομικές κυρώσεις (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 1991).

Πίνακας 1 Πίνακας οριακών τιμών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στο έδαφος (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 1991).

Παράμετροι	Οριακές τιμές (mg/kg ξηράς ουσίας αντιπροσωπευτικού δείγματος εδάφους με pH 6 έως 7)
Κάδμιο	1-3
Χαλκός	50-140
Νικέλιο	30-75
Μόλυβδος	50-300

Ψευδάργυρος	150-300
Υδράργυρος	1-1.5
Χρώμιο	-

Πίνακας 2 Πίνακας οριακών τιμών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στην ιλύ γεωργικής χρήσης (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 1991).

Παράμετροι	Οριακές τιμές (mg/kg ξηράς ουσίας)
Κάδμιο	20-40
Χαλκός	1000-1750
Νικέλιο	300-400
Μόλυβδος	750-1200
Ψευδάργυρος	2500-4000
Υδράργυρος	16-25
Χρώμιο	-

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 80568/4225/91 η χρήση της ιλύος απαγορεύεται κυρίως στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Λειμώνες ή εκτάσεις καλλιέργειας ζωοτροφών, οι οποίες προορίζονται για βόσκηση ή για ζωοτροφές πριν από την πάροδο καθορισμένου χρονικού διαστήματος. Ο καθορισμός του χρονικού διαστήματος εξαρτάται από την γεωγραφική και κλιματολογική κατάσταση της περιοχής και δεν μπορεί να είναι μικρότερη από τρεις εβδομάδες.
2. Καλλιέργειες οπωροκηπευτικών κατά την περίοδο βλάστησης. Εξάιρεση αποτελούν οι καλλιέργειες οπωροφόρων δέντρων.
3. Εδάφη που προορίζονται για καλλιέργειες οπωροκηπευτικών οι οποίες έρχονται σε άμεση επαφή με το έδαφος και καταναλίσκονται σε νωπή κατάσταση, για χρονική περίοδο δέκα μηνών πριν την συγκομιδή και κατά την διάρκεια συγκομιδής.

Με βάση το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) (ΦΕΚ 174/Α' 15.12.2015), η ιλύς αστικής προέλευσης περιλαμβάνει όλους τους τύπους ιλύος οι οποίες προέρχονται από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων (υγρά αστικά απόβλητα, υγρά απόβλητα τουριστικών εγκαταστάσεων, υγρά απόβλητα από βιομηχανίες παραγωγής τροφίμων και ποτών όπως περιγράφονται στο 3<sup>ο</sup> Παράρτημα της ΚΥΑ 5673/400/1997 (Β'192) καθώς και υγρά απόβλητα κοινωφελών οργανισμών. Η αξιοποίηση της ιλύος ως πόρος μπορεί να εφαρμοστεί στη γεωργία καθώς και στην ανάκτηση ενέργειας. Πιο αναλυτικά, η επεξεργασμένη ξηρά ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δευτερογενές καύσιμο σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και σε βιομηχανίες, ενώ η αφυδατωμένη ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοαερίου μέσω της αναερόβιας χώνευσης. Επίσης, η αδρανοποιημένη-σταθεροποιημένη και σχετικά ξηρά ιλύς μπορεί να συμβάλει στην αποκατάσταση τοπίου ως λίπασμα (Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 1986; Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 2015).

Σύμφωνα με την Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/41828/630/2023 (ΦΕΚ 2692/Β' 21.4.2023), ορίζονται οι γενικές απαιτήσεις για την χρήση της επεξεργασμένης ιλύος στο έδαφος καθώς και οι απαγορεύσεις σε εδάφη καλυμμένα με χιόνι, με κορεσμένα ύδατα, με pH χαμηλότερο από 5, σε πάρκα και παιδικές χαρές, σε αθλητικές εγκαταστάσεις, σε δασικές εκτάσεις, σε εδάφη που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 50 μέτρα από λίμνες, ποτάμια και ρέματα, σε υδροτόπους και ελώδεις περιοχές καθώς και σε αμμώδη εδάφη. Επίσης, η χρήση της επεξεργαζόμενης ιλύος μπορεί να εφαρμοστεί στο κλάδο του αγροτικού τομέα ως ανώτερο εδαφικό στρώμα καθώς και για την εδαφική αποκατάσταση. Η χρήση της επεξεργασμένης ιλύος δεν ενδείκνυται σε καλλιέργειες παραγωγής οπωροκηπευτικών, λυκίσκου, βοτάνων, φαρμακευτικών προϊόντων και μπαχαρικών, σε δημοσίους κήπους και θερμοκήπια. Ακόμα, με την συγκεκριμένη νομοθεσία ορίζονται οι οριακές τιμές βαρέων μετάλλων εντός της ιλύος και του εδάφους καθώς και τα μέτρα παραγωγής και χρήσης



της. Επιπρόσθετα, αναφέρονται όλες οι υποχρεώσεις των παραγωγών για την χρήση της επεξεργασμένης ιλύος καθώς και οι απαραίτητοι έλεγχοι για την τήρηση όρων χρήσης και διάθεσής της (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 2023).

Για την χρήση εγκεκριμένης επεξεργασμένης ιλύος απαιτείται η έκδοση άδειας από την αρμόδια Διεύθυνση Αγροτικής Οικονομίας και Κτηνιατρικής της οικείας Περιφερειακής Ενότητας. Η χρονική διάρκεια της άδειας ισοδυναμεί με 10 έτη και δεν πρέπει να υπερβαίνεται (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 2023).

Πίνακας 3 Πίνακας μέγιστων επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων μετάλλων στην επεξεργασμένη ιλύς (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 2023)

Μέταλλα	Οριακές τιμές επιτρεπόμενης συγκέντρωσης (mg/kg ξηράς ουσίας)
Cd	5
Cr (ολικό)	250
Cu	800
Hg	5
Ni	100
Pb	500
Zn	2000
As	40
Na (δεν ισχύει για επεξεργασμένη ιλύς η οποία αξιοποιείται για εδαφική αποκατάσταση)	2000

Πίνακας 4 Πίνακας μέγιστων επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων οργανικών ενώσεων στην επεξεργασμένη ιλύς (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 2023)

Οργανική ένωση	Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση
PCB	0,8 mg/kg ξηράς ουσίας
Άθροισμα Πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων PAH	6 mg/kg ξηράς ουσίας
Βενζο(α)πυρένιο (B(a)P)	1 mg/kg ξηράς ουσίας
Αλογονούχες Οργανικές Ενώσεις (AOX)	400 mg/kg ξηράς ουσίας

Πίνακας 5 Πίνακας μέγιστων επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων παθογόνων οργανισμών-δεικτών στην επεξεργασμένη ιλύς (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 2023)

<i>Salmonella spp</i>	Απουσία σε 25g
<i>Escherichia coli</i>	<5000 CFU σε 1g νωπής ουσίας



Πίνακας 6 Πίνακας μέγιστων επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων μετάλλων στο έδαφος ώστε να επιτρέπεται η χρησιμοποίηση ιλύος (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 2023)

Στοιχεία	Οριακές τιμές στο έδαφος (mg/kg ξηράς ουσίας)		
	5 ≤ pH < 6	6 ≤ pH < 7	pH ≥ 7
Cd	0,5	1	1,5
Cr (ολικό)	50	75	100
Cu	40	50	100
Hg	0,2	0,5	1
Ni	30	50	105
Pb	50	70	100
Zn	100	150	200
As	10	20	30

### 1.5 Αξιοποίηση βιοστερεών

Οι ποσότητες ιλύος, που παράγονται από την επεξεργασία αστικών λυμάτων, αυξάνονται συνεχώς λόγω της λειτουργίας νέων σταθμών επεξεργασίας λυμάτων και των συνεχών αναβαθμίσεων των υφιστάμενων εγκαταστάσεων. Κατά τα τέλη του προηγούμενου αιώνα το μεγαλύτερο ποσοστό της ιλύος διατίθονταν σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ). Με την αυξανόμενη πίεση από τις ρυθμιστικές αρχές και το ευρύ κοινό, η υγειονομική ταφή της ιλύος καταργείται σταδιακά σε πολλές χώρες λόγω της πιθανής δευτερογενούς ρύπανσης που προκαλείται από τα στραγγίσματα και την εκπομπή μεθανίου. Η ιλύς περιέχει υψηλά ποσά οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών και εφόσον επεξεργαστεί κατάλληλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευεργετικά. Πρόσφατα έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, για τη διαχείριση των βιοστερεών και την παραγωγή χρήσιμων προϊόντων από αυτά (Wang et al., 2008).

Η εφαρμογή βιοστερεών επιτυγχάνει πλήρη επαναχρησιμοποίηση των θρεπτικών συστατικών και του οργανικού άνθρακα με σχετικά χαμηλό κόστος. Η επέκταση της εφαρμογής στο έδαφος ωστόσο, μπορεί να περιοριστεί στο μέλλον λόγω των αυστηρότερων κανονιστικών απαιτήσεων και της ανησυχίας του κοινού σχετικά με τη μόλυνση της τροφικής αλυσίδας σε ορισμένες χώρες. Τα τελευταία χρόνια, αυξανόμενος αριθμός εθνικών και τοπικών κυβερνήσεων έχουν υιοθετήσει πιο αυστηρούς κανονισμούς για τη διαχείριση των βιοστερεών.

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών σε αρκετές χώρες (Αυστραλία, Κίνα, ΗΠΑ και ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες) η επαναχρησιμοποίηση των βιοστερεών ως λίπασμα εδάφους σε καλλιέργειες αντιπροσωπεύει την πιο χρησιμοποιούμενη επιλογή διάθεσης. Επίσης, στην συγκεκριμένη περίπτωση, η ιλύς θα πρέπει να υποβληθεί σε διαδικασίες βιολογικής επεξεργασίας (αερόβια ή αναερόβια), θερμική ή/και χημική σταθεροποίηση (π.χ. με ασβέστη) προκειμένου να μετατραπεί σε βιοστερεά που πληρούν τα νομοθετικά πρότυπα που απαιτούνται για γεωργική επαναχρησιμοποίηση. Η υψηλή σταθεροποίηση και η μείωση του επιπέδου του παθογόνου αντιπροσωπεύει βασικές απαιτήσεις για την εφαρμογή εδάφους.

Πίνακας 7 Πίνακας Παραδείγματα εφαρμογών επαναχρησιμοποίησης των βιοστερεών στην γεωργία (Holling *et al.*, 2012; Prosser, Trapp and Sibley, 2014; Brisolara and Qi, 2015; Kumar, Chopra and Srivastava, 2016; Sloan *et al.*, 2016; Tian *et al.*, 2016; Christou *et al.*, 2019; Collivignarelli, Canato, *et al.*, 2019)

Τύπος καλλιέργειας	Είδος βιοστερεών	Αποτελέσματα	Μειονεκτήματα	Βιβλιογραφική αναφορά
Γρασίδι	Βιοστερεά από αναερόβια χώνευση, αποξηραμένα βιοστερεά	Αύξηση των συγκεντρώσεων άνθρακα, θρεπτικών ουσιών και βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Η παραγωγή βιομάζας και η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών αυξήθηκαν λόγω των βιοστερεών. Τα βαρέα μέταλλα δεν μεταφέρθηκαν σημαντικά από το έδαφος σε φυτικό ιστό πάνω από το έδαφος	-	(Sloan <i>et al.</i> , 2016)
Μαρούλι, ραπανάκι, ντομάτα, πιπεριά και λάχανο	Βιοστερεά πλούσια σε καρβαμαζεπίνη, διφαινυδραμίνη και τρικλοκαρμπάνη	Η διφαινυδραμίνη και η τρικλοκαρμπάνη ανιχνεύθηκαν μόνο στους καρπούς των φυτών ντομάτας και πιπεριάς, με τη συγκέντρωση στις ντομάτες να είναι υψηλότερη σε σύγκριση με αυτή της πιπεριάς	Οι ενώσεις παραλήφθηκαν και συσσωρεύτηκαν στην καλλιέργεια	(Christou <i>et al.</i> , 2019)
Καλαμπόκι	Αναερόβια χώνευση, ξήρανση ιλύς	Η χρήση των βιοστερεών ως θρεπτικό συστατικό φωσφόρου για το καλαμπόκι δεν θα προκαλούσε σημαντική βλάβη στις πηγές νερού, ακόμη και ο φώσφορος που χρησιμοποιήθηκε μέσω των βιοστερεών δεν χρησιμοποιήθηκε πλήρως από την ετήσια καλλιέργεια	Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τη διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων της κινητικότητας του φωσφόρου	(Tian <i>et al.</i> , 2016)
Σπανάκι	Αφυδατωμένα βιοστερεά	Περιεκτικότητα σε μέταλλα κάτω από τα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα για τα εδάφη στην Ινδία.	Σημαντική αύξηση του Cd, Cu, Mn και Zn στο έδαφος και την καλλιέργεια	(Brisolara and Qi, 2015; Kumar, Chopra and Srivastava, 2016)
Λάχανο	Μη διαθέσιμη πληροφορία	Οι συνθήκες της ριζόσφαιρας (παρουσία διαλυμένης οργανικής ύλης στη μήτρα φύτευσης) μπορεί να είναι ένας από τους κρίσιμους παράγοντες που καθορίζουν την κινητοποίηση και τη βιοδιαθεσιμότητα ξενοβιοτικών ενώσεων όπως τα φαρμακευτικά προϊόντα και τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας	-	(Holling <i>et al.</i> , 2012; Christou <i>et al.</i> , 2019)
Καρότο, ραπανάκι, μαρούλι, ανοιξιδιάτικο σιτάρι και σόγια	Αφυδατωμένα βιοστερεά αναερόβιας χώνευσης	Ελάχιστος κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία	-	(Prosser, Trapp and Sibley, 2014)

## 1.6 Οφέλη αξιοποίησης βιοστερεών

Η εφαρμογή των βιοστερεών στο έδαφος μπορεί να αντιπροσωπεύει μια ενδιαφέρουσα στρατηγική για τη βελτίωση της παραγωγικότητας μιας περιοχής μέσω της αύξησης της περιεκτικότητας και της γονιμότητας σε οργανική ύλη του εδάφους. Εφόσον πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές και εφαρμόζονται στην κατάλληλη ποσότητα, αποδεδειγμένα βελτιώνουν χαρακτηριστικά του εδάφους όπως είναι η υφή και η κατακράτηση υγρασίας και μπορούν να υποκαταστήσουν τα ακριβά χημικά λιπάσματα. Επιπλέον, μπορούν να προσδώσουν θρεπτικά μακροστοιχεία στα φυτά (όπως N και P) και ιχνοστοιχεία όπως Cu. Ακόμα, επειδή η αποδέσμευση των θρεπτικών στοιχείων από τα βιοστερεά είναι πιο αργή από ότι στα βασικά χημικά ανόργανα λιπάσματα, η πιθανή τους έκπλυση είναι επίσης μικρότερη. Σύμφωνα με την μελέτη των Fuentes *et al.* (2017), η παραδοσιακή τεχνική φύτευσης με την προσθήκη κομποστοποιημένου μείγματος βιοστερεών είχε θετικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη δενδρυλλίων που φυτεύτηκαν σε ημίξηρες πλαγιές, βελτιώνοντας τη διαθεσιμότητα νερού και τη συσσώρευση οργανικής ύλης. Τα πλεονεκτήματα που σχετίζονται με την εφαρμογή των βιοστερεών είναι ευρέως διαδεδομένα κυρίως για την βελτίωση της δομής του εδάφους, την μείωση της χύδην πυκνότητας, την αύξηση του πορώδους εδάφους, την αύξηση της διατήρησης της υγρασίας του εδάφους και την υδραυλική αγωγιμότητα. Επιπλέον, χάρη στην περιεκτικότητα σε άζωτο και φώσφορο, τα βιοστερεά μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την απόδοση των καλλιεργειών. Επίσης, σύμφωνα με την έρευνα των Wang *et al.* (2006), η εφαρμογή των βιοστερεών σε δασικές εκτάσεις φυτειών με έλλειψη θρεπτικών συστατικών μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο εισόδου ρύπων στην ανθρώπινη τροφική αλυσίδα και μπορεί να αυξήσει την ανάπτυξη των δέντρων (Wang *et al.*, 2008; Fuentes, Smanis and Valdecantos, 2017; Collivignarelli, Canato, *et al.*, 2019).

## 1.7 Επιθυμητά συστατικά στα βιοστερεά

### α) Οργανική ύλη

Η ιλύς των αστικών υγρών αποβλήτων περιέχει υψηλά ποσά οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών. Η οργανική ύλη στα αστικά λύματα αποτελείται κυρίως από διαλυτές ουσίες, όπως υδατάνθρακες, αμινοξέα, πρωτεΐνες ή λιπίδια. Βρίσκεται σε υψηλά ποσοστά (συνήθως πάνω από 50% των στερεών) και κυμαίνεται ανάλογα με την επεξεργασία την οποία τα λύματα υπόκεινται (Γιαννάκης, 2021).

Η προσθήκη οργανικής ύλης σε εδάφη βελτιώνει τις φυσικές ιδιότητές του και τα καθιστά πιο ανθεκτικά στη διάβρωση. Η προσθήκη ιλύος ενδείκνυται σε πτωχές γεωργικές εκτάσεις συμβάλλοντας στην αποκατάσταση της οργανικής ύλης του εδάφους που χρησιμοποιείται για καλλιέργεια φυτών. Η αύξηση ποσοστών οργανικής ύλης βελτιώνει την κυκλοφορία του νερού επιτρέποντας στα φυτά να απορροφούν πιο αποτελεσματικά τα θρεπτικά στοιχεία και αυξάνοντας κατά τον τρόπο αυτόν την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Η σταδιακή αποδόμηση της οργανικής ύλης αυξάνει τη περιεκτικότητα του εδάφους σε συστατικά υψηλής γεωργικής αξίας (N, S, Mg κτλ.), τα οποία απελευθερώνονται με αργούς ρυθμούς. Τέλος η οργανική ύλη αποτελεί μία πηγή ενέργειας για τους μικροοργανισμούς που διαβιούν στο έδαφος και η εφαρμογή της ιλύος μπορεί να προκαλέσει αύξηση του εδαφικού πληθυσμού και της εδαφικής δράσης.

### β) Άζωτο (N) και φώσφορος (P)

Η ιλύς περιέχει σημαντικά ποσά N και P που προκύπτουν και από τις διαδικασίες νιτροποίησης-απονιτροποίησης (Metcalf & Eddy 2017), τα οποία μπορούν να ωφελήσουν την ανάπτυξη φυτών και καλλιεργειών και να μειώσουν ή να εξαλείψουν την ανάγκη για συνθετικά λιπάσματα. Στα βιοστερεά το άζωτο βρίσκεται κυρίως σε οργανική μορφή και σε μικρότερη ποσότητα σε αμμωνιακή (ανόργανη) μορφή, ενώ σε μικροποσότητες περιέχονται και άλλες ανόργανες μορφές азώτου. Το άζωτο αποτελεί πολύ σημαντικό ρόλο στη ζωή του φυτού καθώς αποτελεί δομικό συστατικό του μορίου της χλωροφύλλης, διαδραματίζει βασικό ρόλο στην παραγωγή των αμινοξέων, είναι διεγερτικός παράγοντας της ανάπτυξης και λειτουργίας των φυτών κτλ.

Η ιλύς μπορεί να αποτελέσει μια ανανεώσιμη πηγή φωσφόρου, ενός στοιχείου που είναι απαραίτητο για τις καλλιέργειες στο έδαφος (Wadsworth et al. 2018). Χωρίς κατάλληλη παροχή φωσφόρου τα φυτά δεν μπορούν να αναπτυχθούν, καθώς το στοιχείο αυτό αποτελεί το 0,2 % του ξηρού βάρους ενός φυτού (Schachtman et al. 1998). Επιπλέον ο φωσφόρος συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας, που παράγεται κατά τη φωτοσύνθεση, με σκοπό την ανάπτυξη και αναπαραγωγή του φυτού. Όπως και στην περίπτωση του αζώτου η ποσότητα του διαθέσιμου φωσφόρου στην ιλύ εξαρτάται από την μέθοδο της επεξεργασίας και δεν είναι ανάλογη της ποσότητας του συνολικού φωσφόρου.

#### **γ) Βασικά μικροθρεπτικά συστατικά και κάλιο (Κ)**

Τα βιοστερεά περιέχουν πολλά απαραίτητα μικροθρεπτικά στοιχεία για τα φυτά, όπως Fe, Cu, Mn, Zn, B, Mo και Cl τα οποία δεν παρέχονται σε επαρκή βαθμό από τα περισσότερα συμβατικά χημικά λιπάσματα. Αυτά τα κύρια αυτά θρεπτικά στοιχεία βρίσκονται κυρίως σε οργανική μορφή και δεν είναι τόσο διαλυτά όπως στα χημικά λιπάσματα. Επομένως η χρήση των βιοστερεών σε καλλιέργειες μπορεί να συμβάλλει στην καλύτερη θρέψη και παροχή των βασικών αυτών θρεπτικών στοιχείων στα φυτά, για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, με καλύτερη απόδοση και με βραδύτερο ρυθμό ελαττώνοντας την πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Καταλήγοντας, τα βιοστερεά μπορεί να αποτελέσουν πολύτιμη πηγή Κ (0,1-0,6%) αλλά με μικρότερη απόδοση σε σύγκριση με τα εμπορικά λιπάσματα (Γιαννάκης, 2021).

### **1.8 Εφαρμογή βιοστερεών για λίπανση εδαφών που προορίζονται για γεωργική χρήση**

Το βέλτιστο σχέδιο διαχείρισης της ιλύος πρέπει να βασίζεται στην ανακύκλωση υλικών και ενέργειας. Η εναπόθεση της ιλύος σε ΧΥΤΑ αποτελεί μια διαδικασία που εκμεταλλεύεται σε μηδαμινό ποσοστό τις εξαιρετικές δυνατότητες που διαθέτει η κατεργασμένη ιλύς. Αντίστοιχα η αποτέφρωση της ιλύος, αν και διαθέτει κάποια πλεονεκτήματα, όπως μειώνει το συνολικό όγκο του υλικού προς διάθεση, καταστρέφει εντελώς τα παθογόνα, και μπορεί να ανακτήσει τη θερμική αξία που περιέχεται σε αυτή, εγκυμονεί και αρκετούς κινδύνους. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από υψηλές δαπάνες κατασκευής και απαιτήσεις συντήρησης, μεγάλες λειτουργικές δαπάνες, ενώ δημιουργούνται προβλήματα ρύπανσης του περιβάλλοντος, τόσο από την καύση της ιλύος όσο και από τη διάθεση της τέφρας σε αυτό (έκπλυση βαρέων μετάλλων) (W. Y. Lin et al. 2018).

Αντίθετα, η χρήση βιοστερεών για λίπανση εδαφών που προορίζονται για γεωργική χρήση αποτελεί μία βιώσιμη μέθοδο διαχείρισής τους, έχοντας ταυτόχρονα αρκετά πλεονεκτήματα όπως (Γιαννάκης, 2021):

- Συντελεί στην επίλυση του προβλήματος διαχείρισης των «αποβλήτων», αξιοποιώντας τα θρεπτικά τους συστατικά προς όφελος της ανάπτυξης των φυτών.
- Αποτελεί μία οικονομική μέθοδο διαχείρισης της ιλύος.
- Εξοικονομεί πόρους που προορίζονταν για τη διάθεση της ιλύος σε ΧΥΤΑ.
- Περιορίζει την αγορά εδαφοβελτιωτικών που αποσκοπούν στην αναβάθμιση των εδαφών και τη λίπανση των καλλιεργειών.

Το πρόβλημα εύρεσης μίας βιώσιμης λύσης για τη διαχείριση της ιλύος, που παράγεται από τις ΕΕΛ κατά την επεξεργασία των αποβλήτων, είναι υπαρκτό και αναμένεται να οξυνθεί τα επόμενα χρόνια καθώς οι ποσότητες της ιλύος θα αυξηθούν. Σύμφωνα με τον ΕΣΔΑ του 2020 (ΦΕΚ 185/Α/29-9-2020), οι ιλύες που προέρχονται από ΕΕΛ πόλεων και τουριστικών μονάδων στην Ελλάδα αναμένεται να αυξηθούν έως και περίπου μιάμιση φορά μέχρι το 2030, σε σχέση με τις ποσότητες που παράχθηκαν το 2018. Επομένως, η επιτυχής εφαρμογή των βιοστερεών στη γεωργία κρίνεται ότι συμβάλλει στην επίλυση τους προβλήματος αυτού, μεταβαίνοντας από το υφιστάμενο μοντέλο διαχείρισης των αποβλήτων σε μια αειφόρο, αποδοτική και ανταγωνιστική κυκλική οικονομία. Ωστόσο θα πρέπει να τονιστεί ότι αν και η επαναχρησιμοποίηση της ιλύος πρέπει να ενθαρρύνεται και να πριμοδοτείται καθώς αποτελεί ανανεώσιμο φυσικό πόρο, η ορθολογική αξιοποίηση του οποίου είναι πολύ

σημαντική για την οικονομία, σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να επιτραπεί, η αλόγιστη-μη ελεγχόμενη εφαρμογή της που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη συγκέντρωση στο έδαφος οινωδήποτε επιβλαβών ουσιών, ανόργανων ή/και οργανικών, ή/και παθογόνων μικροοργανισμών, οπότε επαγωγικά μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα ρύπανσης και μόλυνσης εδαφών και υδροφορέων (Κουλουμπής & Τσαντίλας 2008).

## 2. ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΙΛΥΟΣ ΩΣ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΕΔΑΦΟΓΕΝΩΝ ΦΥΤΟΠΑΘΟΓΟΝΩΝ

### 2.1 Μολυσματικές ασθένειες φυτών

Το έδαφος αποτελεί ένα σύνθετο οικοσύστημα που φιλοξενεί έναν πολύ μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών που αλληλεπιδρούν τόσο με τα φυτά όσο και μεταξύ τους. Οι περισσότεροι από τους μικροοργανισμούς αυτούς αναπτύσσονται στη ριζόσφαιρα όπου και επιτελούνται σημαντικές διαδικασίες για την ανάπτυξη και την υγεία των φυτών (Bakker et al., 2013). Ορισμένοι από τους μικροοργανισμούς αυτούς, όπως οι μυκορριζικοί μύκητες και άλλα ωφέλιμα συμβιωτικά βακτήρια, δρουν ευεργετικά για τα φυτά, προάγοντας την ανάπτυξή τους (Jacoby et al., 2017).

Ωστόσο, τα φυτά είναι εκτεθειμένα και σε ένα ευρύ φάσμα φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών, που διαβιούν στο έδαφος όπως μύκητες, ορισμένα βακτήρια αλλά και ανώτεροι οργανισμοί όπως νηματώδεις, που προσβάλλουν το φυτό προκαλώντας την ασθένεια ή/και τον θάνατό του (Agrios, 2017). Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί παρασιτούν εις βάρος των φυτών, καταναλώνοντας ή και υποβαθμίζοντας τους φυτικούς ιστούς, με αποτέλεσμα να επηρεάσουν άμεσα την εύρυθμη λειτουργία του φυτού (Γιαννάκης, 2021). Οι ασθένειες που οφείλονται στην παρουσία εδαφογενών παθογόνων προκαλούν συνήθως σήψεις του λαιμού, της ρίζας και των αγγείων των φυτών και αναστέλλουν την αναπαραγωγική τους λειτουργία, επιφέροντας μεγάλες απώλειες σε καλλιέργειες παγκοσμίως (Katan, 2017). Παρόλο που τα φυτοπαθογόνα είναι πολύ διαφορετικά μεταξύ τους, εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες στον τρόπο επιβίωσής τους και μεταφοράς τους στο έδαφος. Συνήθως επιζούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα στο έδαφος και επηρεάζονται άμεσα από τις γεωργικές πρακτικές που εφαρμόζονται σε αυτό, όπως άρδευση, άροση, λίπανση κτλ. καθώς και από τα βιοτικά και αβιοτικά συστατικά του εδάφους.

### 2.2 Καταστολή και αντιμετώπιση των ασθενειών των φυτών με την εφαρμογή κομπόστ

Η καταπολέμηση των φυτικών ασθενειών, που οφείλονται σε παθογόνους μικροοργανισμούς, πραγματοποιείται συνήθως με τη χρήση χημικών μέσων. Τα μέσα αυτά στοχεύουν στον περιορισμό της βλάστησης, της ανάπτυξης και της αναπαραγωγής του παθογόνου ή και το νεκρώνουν ευθέως (Agrios, 2017). Ωστόσο, αν και η χρήση φυτοφαρμάκων φαίνεται μια αποτελεσματική λύση έναντι αρκετών φυτικών ασθενειών που προκαλούνται από παθογόνα, η αλόγιστη χρήση τους κρίνεται επικίνδυνη και περιβαλλοντικά μη αποδεκτή. Τα φυτοφάρμακα είναι τοξικές ουσίες που ενδέχεται να ρυπάνουν τα εδαφικά οικοσυστήματα, η χρήση τους μπορεί να είναι επιβλαβής για την ευεργετική μικροχλωρίδα του εδάφους και είναι πιθανός ο κίνδυνος της μεταβίβασης υπολειμματικών, επικίνδυνων ουσιών από τις καλλιέργειες μέσω των γεωργικών προϊόντων στα ζώα και στον άνθρωπο (Kannojia et al., 2019). Ως εκ τούτου, συντελούνται προσπάθειες σταδιακής μείωσης της χρήσης συμβατικών χημικών και εξεύρεσης μιας περιβαλλοντικά πιο αποδεκτής λύσης.

Σε πολλές περιπτώσεις η χρήση μιγμάτων κομπόστ που προέρχονται από γεωργικά κατάλοιπα, είχε ως αποτέλεσμα την επιτυχή αντιμετώπιση ποικίλων ασθενειών και ιδίως αυτών που προέρχονται από παθογόνα που διαβιούν στο έδαφος, όπως την βερτισιλλίωση της πιπεριάς από το παθογόνο *Verticillium dahliae* (Tubieleh & Stephenson 2020) και τη σήψη ρίζας και λαιμού της τομάτας από το παθογόνο *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis-lycopersici* (Forl) (Kavroulakis et al., 2005). Τα κομπόστ είναι υλικά πλούσια σε οργανική ύλη, χρησιμοποιούνται ως εδαφοβελτιωτικά και παράγονται από την αποσύνθεση οργανικών υλικών με τη διαδικασία της κομποστοποίησης (Stewart-Wade, 2020). Αξίζει να σημειωθεί ότι η λίπανση με προσθήκη κατάλληλης ποσότητας οργανικής ύλης παρέχει πολλά οφέλη στα εδάφη, όπως αύξηση της διαθεσιμότητας και καλύτερη συγκράτηση των θρεπτικών συστατικών των φυτών, τόνωση της ανάπτυξης των ριζών, αύξηση της βιολογικής ποικιλομορφίας κτλ. (Abawi & Widmer 2000).

Σε κάποιες μελέτες έχει αποδειχτεί ότι η καταστολή της ασθένειας με χρήση μιγμάτων κομπόστ οφείλεται στους πιθανούς τύπους αλληλεπιδράσεων, όπως είναι ο ανταγωνισμός για κατανάλωση θρεπτικών στοιχείων, ο υπερπαρασιτισμός, η παραγωγή αντιμικροβιακών ουσιών και η ενζυματική



υδρόλυση των κυτταρικών τοιχωμάτων, μεταξύ της μικροχλωρίδας που ενυπάρχει στο κομπόστ και των παθογόνων των φυτών (Kavroulakis et al., 2006). Σε άλλες μελέτες αποδείχτηκε ότι η χρήση μιγμάτων κομπόστ, ως εδαφοβελτιωτικών στα υποστρώματα ανάπτυξης φυτών, μπορεί να επάγει έναν έμμεσο μηχανισμό άμυνας του φυτού που ονομάζεται διασυστηματική αντοχή (He et al., 2020). Πολλές φορές παρατηρείται ότι τα φυτά που έχουν μολυνθεί από κάποιο παθογόνο καθίστανται πιο ανθεκτικά σε επακόλουθη προσβολή από το ίδιο ή από διαφορετικό παθογόνο. Η διασυστηματική αντοχή επάγει την αντοχή αυτή και μπορεί να προκληθεί στα φυτά έπειτα από μόλυνση τους με παθογόνους μικροοργανισμούς ή έπειτα από τον αποικισμό των ριζών τους με μη παθογόνους μικροοργανισμούς που ζουν στην ριζόσφαιρα ή από ουσίες που υπάρχουν από τη φύση στο παθογόνο και μπορούν να ληφθούν από αυτό, ή από άλλα ερεθίσματα που υπάρχουν στη φύση (Agrios, 2017).

### **2.3 Αντιμετώπιση των ασθενειών των φυτών με την εφαρμογή βιοστερεών**

Από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει αποδειχτεί ότι η χρήση βιοστερεών ως λιπάσματος σε καλλιέργειες μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά για το φυτό στην αντιμετώπιση ασθενειών που οφείλονται σε παθογόνους μικροοργανισμούς (Γιαννάκης, 2021). Στην έρευνα των Pinto et al. (2013) φάνηκε ότι η ενσωμάτωση κομποστοποιημένης λυματολάσπης σε υπόστρωμα με βάση φλοιούς πεύκων, μείωσε σημαντικά το μαρασμό χρυσάνθεμων που οφειλόταν στον παθογόνο μύκητα *F. oxysporum* f. sp. *Crysanthemi*, ενώ στην έρευνα των Cotxarrera et al. (2002) φάνηκε ότι η χρήση κομποστοποιημένης λυματολάσπης στο υπόστρωμα ανάπτυξης των φυτών, ήταν αποτελεσματική για την καταστολή της φουζαρίωσης της τομάτας, που οφειλόταν στον παθογόνο μύκητα *F. oxysporum* f. sp. *Iycopersici*. Η ικανότητα κάποιων βιοστερεών να λειτουργούν ως φυτοπροστατευτικά έναντι αυτού του παθογόνου μύκητα και ενδεχομένως άλλων παθογόνων μικροοργανισμών, οφείλεται στη σύστασή τους. Όπως και τα κομπόστ, τα βιοστερεά μπορεί να χαρακτηριστούν ως οργανικά εδαφοβελτιωτικά υλικά. Έχει προαναφερθεί παραπάνω ότι είναι πλούσια σε οργανική ύλη, που όταν ενσωματωθούν στο έδαφος του προσφέρουν: θρεπτικά στοιχεία και οργανικές ενώσεις, όπως αμινοξέα, κατακρατούν καλύτερα την υγρασία και συμβάλλουν στον καλύτερο αερισμό του (Brown et al. 2020). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το έδαφος να μπορεί να υποστηρίξει εντονότερη μικροβιακή δραστηριότητα, που είναι ωφέλιμη για την ανάπτυξη του φυτού και ταυτόχρονα ενδέχεται να περιορίζει τη δράση του παθογόνου.

Στις περισσότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για την αντιμετώπιση των ασθενειών των φυτών, παρατηρείται ότι η ιλύς συνήθως κομποστοποιείται για να χρησιμοποιηθεί, δηλαδή δεν εφαρμόζεται κατευθείαν μετά την επεξεργασία της από μία ΕΕΛ. Κρίνεται ότι η μη διαδεδομένη εφαρμογή της συγκεκριμένης ιλύος οφείλεται στην ελλιπή επεξεργασία των στερεών αποβλήτων από τις ΕΕΛ τα παλαιότερα χρόνια ή στην απουσία ύπαρξης εξελιγμένων ΕΕΛ. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ενός προϊόντος μη ασφαλούς προς διάθεση στη γεωργία, το οποίο θα χρειαζόταν περαιτέρω επεξεργασία (κομποστοποίηση). Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου οι τεχνολογίες επεξεργασίας των προϊόντων αυτών έχει εξελιχτεί σε σημαντικό βαθμό βελτιώνοντας την ποιότητα των παραχθέντων βιοστερεών (Metcalf & Eddy 2017).

Στην εργασία των Giannakis et al. (2021) χρησιμοποιήθηκε μη κομποστοποιημένη ιλύς, που έχει υποστεί αναερόβια χώνευση, για την ενίσχυση της ανάπτυξης φυτών τομάτας και την παρεμπόδιση της σήψης λαϊμού και ρίζας της τομάτας που προκαλείται από τον φυτοπαθογόνο μύκητα *Forl*. Στη μελέτη αυτή αποδείχτηκε ότι τα φυτά τομάτας που αναπτύχθηκαν σε υποστρώματα με ιλύ και μολύνθηκαν με *Forl* εμφάνισαν καθολικά χαμηλότερο δείκτη ασθένειας και υψηλότερους δείκτες ανάπτυξης, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες επεμβάσεις χωρίς την προσθήκη ιλύος. Ακόμα, στην εργασία των Stavridou et al. (2021) εξετάστηκαν οι αιτίες σύμφωνα με τις οποίες η εφαρμογή βιοστερεών (χρησιμοποιήθηκε μη κομποστοποιημένη ιλύς, που έχει υποστεί αναερόβια χώνευση), σε υπόστρωμα ανάπτυξης των φυτών τομάτας, θα μπορούσε να έχει φυτοπροστατευτική δράση έναντι του παθογόνου *Forl*. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή η προσθήκη ιλύος στα υποστρώματα ανάπτυξης των φυτών τομάτας: α) ευνόησε συνολικά την ανάπτυξη τους όπως και των συμβιωτικών-ωφέλιμων για τα φυτά μικροοργανισμών του εδάφους β) ενίσχυσε την άμυνα του φυτού διεγείροντας



σε μεγαλύτερο βαθμό γονίδια που είναι υπεύθυνα για την άμυνα του φυτού τομάτας και ευνοώντας την ανάπτυξη μικροοργανισμών που δρουν ανταγωνιστικά προς τη δράση και την εξάπλωση φυτοπαθογόνων.

Σήμερα για την επεξεργασία της ιλύος στις περισσότερες ΕΕΛ πραγματοποιείται αναερόβια χώνευσή της, η οποία εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της κομποστοποίησης (L. Lin et al. 2018). Το κυριότερο πλεονέκτημα της αναερόβιας χώνευσης έναντι της κομποστοποίησης, είναι το αρκετά χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας των αποβλήτων σε μία κεντρική ΕΕΛ, ενώ αντίθετα, η κομποστοποίηση συμφέρει οικονομικά μόνο σε μικρές εγκαταστάσεις επεξεργασίας βιοαποδομήσιμων υλικών. Επιπροσθέτως, αν και η κομποστοποίηση μπορεί να αποδομεί σε υψηλότερο βαθμό την οργανική ύλη, δεν είναι εύκολα εφικτή σε βιοαποδομήσιμα υλικά υψηλής υγρασίας όπως η ιλύς από ΕΕΛ, σε αντίθεση με την αναερόβια επεξεργασία.

Ως εκ τούτου, ο διαφορετικός τρόπος επεξεργασίας των βιοστερεών από τις ΕΕΛ επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον βαθμό σταθεροποίησης τους και επομένως στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Συνεπώς, κρίνεται ότι απαιτείται περισσότερη έρευνα σχετικά με τη βιολογική και χημική σύσταση των βιοστερεών αλλά και κατά πόσο αυτή, σε περίπτωση εφαρμογής τους στη γεωργία για λίπανση καλλιεργειών, θα επηρεάσει τη βιοποικιλότητα των οργανισμών του εδάφους και τη σύστασή του και συνεπώς την προστασία του φυτού απέναντι σε ένα παθογόνο (Scotti et al. 2015).

### 3. ΒΙΟ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Η τεχνική της βιο-ενίσχυσης προσομοιώνει μία φυσική διαδικασία εδαφοβελτίωσης, αυτή της φυσικής τσιμεντοποίησης του εδάφους, ως αποτέλεσμα της μεταβολικής δραστηριότητας ωφέλιμων μη-παθογόνων βακτηρίων που εισάγονται στο έδαφος. Αν και ο αριθμός των σχετικών μελετών είναι προς το παρόν εξαιρετικά περιορισμένος, η βιο-ενίσχυση των εδαφών βρίσκει πληθώρα εφαρμογών, μεταξύ των οποίων είναι η σταθεροποίηση των εδαφών και η αύξηση της αντοχής τους, ο έλεγχος της διάβρωσης, η αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών, η στεγανοποίηση δεξαμενών γεωργικών εκμεταλλεύσεων και η διαχείριση αγροτικών αποβλήτων. Η προώθηση και ανάπτυξη – για πρώτη φορά στην Ελλάδα – της εν λόγω μεθόδου, η οποία αποτελεί μία καθαρά βιώσιμη και «πράσινη» τεχνική βελτίωσης εδαφών, συνδέεται άμεσα με το Σχέδιο Δράσης Υλοποίησης 1.4 της Εθνικής Στρατηγικής για την Κυκλική Οικονομία: «Προσαρμογή πλαισίου κατασκευών δημοσίων και ιδιωτικών έργων» και με τις αρχές της Ευρωπαϊκής Πράσινης συμφωνίας για τη συνοριακή προσαρμογή του άνθρακα. Επιπλέον, η προτεινόμενη τεχνική βιο-ενίσχυσης αποτελεί μία καινοτόμο τεχνολογία που συμπίπτει με τον κλάδο «Y02W 90/00 - Enabling technologies or technologies with a potential or indirect contribution to greenhouse gas emissions mitigation», του Παραρτήματος του πλαισίου παρακολούθησης δεικτών της κυκλικής οικονομίας της ΕΕ της κατηγορίας «Ανταγωνιστικότητα και Καινοτομία του δείκτη Ευρεσιτεχνίες που σχετίζονται με την ανακύκλωση και τα δευτερογενή υλικά».

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος της βιο-ενίσχυσης και οι βιο-γεωχημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου. Περιγράφεται η πλέον διαδεδομένη τεχνική βιο-ενίσχυσης, γνωστή ως Μικροβιακά Επαγόμενη Καθίζηση Ανθρακικού Ασβεστίου (Microbially Induced Calcite Precipitation - MICP). Παρουσιάζονται επίσης τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής της μεθόδου, καθώς και οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των βιο-ενισχυμένων εδαφών, σύμφωνα με την υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία. Τέλος, γίνεται σύγκριση, σε μικρο- και μακρο-σκοπικό επίπεδο, της συμπεριφοράς των βιο-ενισχυμένων εδαφών με την αντίστοιχη των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών, που βελτιώθηκαν με άλλες, λιγότερο βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές μεθόδους, όπως με τη χρήση τσιμέντου ή χημικών ενεμάτων.

#### 3.1 Η μέθοδος της βιο-ενίσχυσης

Στα πλαίσια της αναζήτησης βιώσιμων και περισσότερο «πράσινων» τεχνικών βελτίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους, πρόσφατες έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην εξεύρεση «λύσεων από τη φύση», και συγκεκριμένα στην αξιοποίηση των ζωντανών μικροοργανισμών του εδάφους και των βιογεωχημικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό (DeJong et al. 2011; Terzis & Laloui 2019). Συγκεκριμένα η βιο-ενίσχυση εδαφών, μέσω της βιο-ανάπτυξης ή βιο-διέγερσης μη-παθογόνων βακτηρίων στο έδαφος, έχει αποδειχτεί ότι οδηγεί σε μεταβολή της μικροδομής των εδαφών και σε μακροσκοπική βελτίωση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους, ως αποτέλεσμα της δημιουργίας φυσικών συγκολλητικών δεσμών τσιμεντοποίησης στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων και στα κενά των εδαφικών πόρων (DeJong et al. 2013). Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως βιο-τσιμεντοποίηση, αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη μέθοδο βελτίωσης εδαφών, με πληθώρα εφαρμογών, μεταξύ των οποίων η αύξηση της αντοχής των εδαφών, η απομείωση του κινδύνου ρευστοποίησης αμμωδών εδαφών, η σταθεροποίηση πρανών και ο έλεγχος της διάβρωσης. Παρ' ό,τι η μέθοδος της βιο-ενίσχυσης βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο ακόμη διεθνώς, φαίνεται πως μπορεί να αντικαταστήσει αποτελεσματικά τις περισσότερο απαιτητικές σε κατανάλωση ενέργειας μεθόδους μηχανικής συμπίκνωσης, ή τις ακριβές και περιβαλλοντικώς μη φιλικές τεχνικές χημικών ενεμάτων (chemical grouting), για τη βελτίωση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους (Ivanov & Chu 2008).

Η βιο-τσιμεντοποίηση βασίζεται στην ιδέα της χημικής τσιμεντοποίησης ή χημικής ενεμάτωσης, σύμφωνα με την οποία γίνεται πλήρωση των πόρων κοκκωδών εδαφών με ρευστά χημικά ενέματα, ώστε να αυξηθεί η αντοχή τους (Karol 2003). Τα χημικά ενέματα περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων

πυριτικό νάτριο, ακρυλικά, πολυουρεθάνες, υδροξείδιο του ασβεστίου (άσβεστο), τσιμέντο και γύψο. Στις τρεις τελευταίες περιπτώσεις, η προκαλούμενη τσιμεντοποίηση αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως τεχνητή τσιμεντοποίηση (artificial cementation) (Gallagher 2010; Βράννα 2016).

Αντί των παραπάνω χημικών ενεμάτων, η τσιμεντοποίηση μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή στο έδαφος μικροβίων και άλλων βιο-υλικών, η προκαλούμενη τσιμεντοποίηση είναι γνωστή ως μικροβιακή τσιμεντοποίηση ή δομική μικροβιακή ενεμάτωση (structural microbial grouting), ή, συνηθέστερα, βιο-τσιμεντοποίηση (Ivanov & Chu 2008; Terzis & Laloui 2019). Η προκαλούμενη συγκόλληση μεταξύ των εδαφικών κόκκων και ως εκ τούτου η μεταβολή της εδαφικής δομής είναι αποτέλεσμα της δημιουργίας κρυστάλλων ανόργανων ορυκτών, συνηθέστερα ανθρακικού ασβεστίου,  $\text{CaCO}_3$  (Ferris et al. 1996), στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων και στο εσωτερικό των πόρων του εδάφους.

Η μέθοδος της βιο-τσιμεντοποίησης αποτελεί πρακτικά μία τεχνητή διαδικασία επιτάχυνσης της φυσικής τσιμεντοποίησης του εδάφους που λαμβάνει χώρα στα πλαίσια της εδαφογέννησης, η οποία μπορεί να συμβεί με πολύ αργό ρυθμό στη φύση εξαιτίας της δραστηριότητας μικροβίων *in situ*, εφόσον ικανοποιούνται οι συνθήκες για την πρόκληση καθίζησης  $\text{CaCO}_3$  (van Paassen 2009; Mujah et al. 2016).

Η βιο-τσιμεντοποίηση πραγματοποιείται είτε με βιο-ανάπτυξη (bio-augmentation) είτε με βιο-διέγερση (bio-stimulation) (DeJong et al. 2013). Στην πρώτη περίπτωση, γίνεται καλλιέργεια των μικροβίων *ex-situ*, συνηθέστερα των *Sporosarcina pasteurii* (*S. pasteurii*), και στη συνέχεια αυτά τοποθετούνται στο υπό βελτίωση έδαφος. Η τεχνική της βιο-διέγερσης περιλαμβάνει την πρόκληση αύξησης της δραστηριότητας των ήδη υπάρχοντων βακτηρίων στο έδαφος. Η βιο-διέγερση αποκλείει την πιθανή ρύπανση ή διατάραξη των επί τόπου περιβαλλοντικών συνθηκών, καθώς απαιτεί τη διέγερση υπάρχοντων μικροβίων που είναι προσαρμοσμένα στο περιβάλλον του υπό βελτίωση εδάφους (Gomez et al. 2016). Επιπλέον, οι κρύσταλλοι  $\text{CaCO}_3$  που δημιουργούνται στην περίπτωση της βιο-διέγερσης είναι μεγαλύτεροι και καλύτερα δομημένοι, σε σύγκριση με τους αντίστοιχους που προκύπτουν με την βιο-ανάπτυξη (Gomez et al. 2019). Ωστόσο, η επίτευξη ανομοιομόρφης βελτίωσης του εδάφους και ο αυξημένος χρόνος ανάπτυξης των βακτηρίων κατά τη βιο-διέγερση, καθιστούν περισσότερο κατάλληλη τη μέθοδο της βιο-ανάπτυξης, με την προϋπόθεση της εισαγωγής μικρής συγκέντρωσης βακτηρίων στο προβληματικό έδαφος αρχικά και της αποτελεσματικής ανάπτυξής τους, στη συνέχεια (DeJong et al. 2013). Σε εδάφη με υψηλό ποσοστό οργανικής ουσίας, η βιο-διέγερση παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, ενώ σε αμμώδη εδάφη, πτωχά σε θρεπτικές ουσίες, προτιμάται η βιο-ανάπτυξη με επαναλαμβανόμενες εγχύσεις θρεπτικών (Dhami et al. 2017).

#### Η διαδικασία καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου

Η καθίζηση του  $\text{CaCO}_3$  αποτελεί μία αυθόρμητη χημική διαδικασία που συμβαίνει σε συνθήκες υπέρκορου διαλύματος με αυξημένη τιμή pH (Cheng 2012). Ο ακριβής ρόλος των μικροβίων στην καθίζηση του  $\text{CaCO}_3$  δεν είναι ακόμη ξεκάθαρος, ωστόσο το μεγαλύτερο ποσοστό των ετερότροφων βακτηρίων μπορεί να την προκαλέσει (Hammes et al. 2003). Μεταξύ των μεταβολικών δραστηριοτήτων των μικροβίων που μπορούν να οδηγήσουν σε καθίζηση  $\text{CaCO}_3$  (φωτοσύνθεση, αμμωνιοποίηση κ.α.), η υδρόλυση της ουρίας θεωρείται η πλέον κατάλληλη για την διαμόρφωση βιο-ενισχυμένων εδαφών (Montoya 2008; Dhami et al. 2014). Οι υπόλοιπες διαδικασίες παρουσιάζουν βραδύτερο ρυθμό καθίζησης  $\text{CaCO}_3$  και διατήρησης υπέρκορων συνθηκών και ως εκ τούτου δεν συνιστώνται. Επιπλέον, η υδρόλυση της ουρίας προτιμάται γιατί είναι μία άμεση και ελεγχόμενη διαδικασία (Dhami et al. 2013), με έως και 90% αποδοτικότητα στην ποσότητα παραγόμενου  $\text{CaCO}_3$ , σε λιγότερο από 24 ώρες (Al-Thawadi 2011). Ακολούθως, περιγράφεται η διαδικασία υδρόλυσης της ουρίας και η κατάλυσή της μέσω του ενζύμου της ουρεάσης.

Η υδρόλυση της ουρίας παρουσία κατιόντων Ca, αποτελεί την πιο απλή και ενεργειακά αποδοτική διαδικασία καθίζησης  $\text{CaCO}_3$ . Η μη-αντιστρέψιμη αυτή διαδικασία περιλαμβάνει τέσσερις συνολικά αντιδράσεις, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

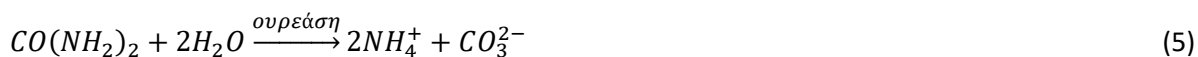




Συγκεκριμένα, η ουρία,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  αντιδρά αρχικά με το νερό,  $\text{H}_2\text{O}$ , με αποτέλεσμα την παραγωγή αμμωνίας,  $\text{NH}_3$  και διοξειδίου του άνθρακα,  $\text{CO}_2$ . Ακολουθεί η αντίδραση της  $\text{NH}_3$  με το νερό και η παραγωγή κατιόντων αμμωνίου,  $\text{NH}_4^+$  και ανιόντων υδροξυλίου  $\text{OH}^-$ , τα οποία οδηγούν σε αύξηση του pH, γεγονός που ευνοεί την καθίζηση  $\text{CaCO}_3$ . Τα ανιόντα υδροξυλίου,  $\text{OH}^-$ , αντιδρούν με το  $\text{CO}_2$ , με αποτέλεσμα την παραγωγή όξινου ανθρακικού ιόντος,  $\text{HCO}_3^-$ . Τέλος, το  $\text{HCO}_3^-$ , με την παρουσία κατιόντων ασβεστίου και ανιόντων υδροξυλίου, παράγει τους κρυστάλλους  $\text{CaCO}_3$ .

Η χημική υδρόλυση της ουρίας που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί μία ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία, η οποία μπορεί να επισπευθεί με κατάλυσή της από το υψηλής δραστηριότητας ένζυμο ουρεάση (*urea amidohydrolase*, EC 3.5.1.5) (Mobley & Hausinger 1989; Ran & Kawasaki 2016). Συγκεκριμένα, το ένζυμο ουρεάση είναι ένα μεταλλοένζυμο εξαρτώμενο από το νικέλιο, που επιταχύνει τη διαδικασία της υδρόλυσης  $10^{14}$  φορές σε σχέση με τη μη-καταλυόμενη αντίδραση (Hausinger 1993; Estiu & Merz 2004).

Η κατάλυση της υδρόλυσης της ουρίας περιγράφεται από τις αντιδράσεις (5) – (6) (van Paassen 2009). Οι αντιδράσεις αυτές πρακτικά αποτελούν συντόμηση της διαδικασίας που περιγράφεται από τις αντιδράσεις (1) – (4), με μοναδική διαφορά την καταλυτική δράση της ουρεάσης.



Συγκεκριμένα, το ένζυμο ουρεάση καταλύει την υδρόλυση της ουρίας, με αποτέλεσμα την παραγωγή αμμωνίου,  $\text{NH}_4^+$  και ανθρακικών ιόντων,  $\text{CO}_3^{2-}$ . Το αμμώνιο οδηγεί σε τοπική αύξηση του pH του συστήματος. Τα ανθρακικά ιόντα αντιδρούν με τα κατιόντα του ασβεστίου, με αποτέλεσμα την παραγωγή και καθίζηση  $\text{CaCO}_3$ .

Η ουρεάση εμφανίζεται είτε ως ενδο-κυτταρικό ή ως εξω-κυτταρικό ένζυμο (Hamdan et al. 2013) και βρίσκεται σε ποικίλους ευκαρυωτικούς οργανισμούς, όπως σε φυτικά εκχυλίσματα, ασπόνδυλα και μύκητες, αλλά και σε προκαρυωτικούς μικροοργανισμούς, όπως βακτήρια (Mobley & Hausinger 1989). Η δράση του ενζύμου ευνοείται σε τιμές pH μεταξύ 8 και 9 (Stocks-Fischer et al. 1999).

Στα πλαίσια της βιο-τσιμεντοποίησης, η ουρεάση αποτελεί συνηθέστερα προϊόν ουρεολυτικών βακτηρίων ή ουρεολυτικών φυτικών εκχυλίσμάτων. Συγκεκριμένα, η συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών ερευνών έχει εφαρμόσει την τεχνική «MICP», δηλαδή «Microbially Induced Calcite Precipitation», ή «μικροβιακώς επαγόμενη καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου», με χρήση ουρεολυτικών βακτηρίων. Σημειώνεται ότι ορισμένες μελέτες έχουν δημοσιευτεί επίσης με αντικείμενο την εφαρμογή της μεθόδου «PDUICCP», δηλαδή «Plant Derived Urease-Induced Calcium Carbonate Precipitation», ή «ουρεολυτική επαγόμενη καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου προκαλούμενη από φυτά». Ο αριθμός αυτών των μελετών είναι αισθητά περιορισμένος σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μελέτες με αντικείμενο την MICP.

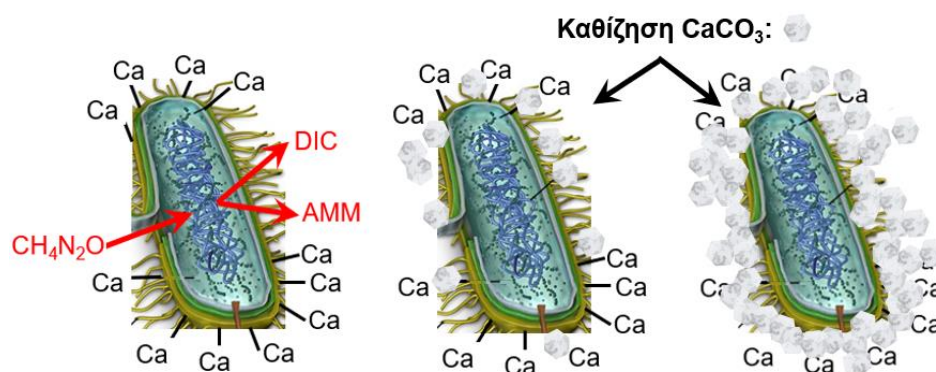
#### Ουρεολυτικά βακτήρια

Το Σχήμα 1 παρουσιάζει με απλουστευμένο τρόπο την δράση των ουρεολυτικών βακτηρίων που οδηγεί στην καθίζηση  $\text{CaCO}_3$ . Σύμφωνα με τους Ferris et al. (2004), η προκαλούμενη καθίζηση κρυστάλλων  $\text{CaCO}_3$  από τα ουρεολυτικά βακτήρια πραγματοποιείται σε τρία στάδια:

- i. Αρχικά αναπτύσσεται ένα υπερκορεσμένο διάλυμα

- ii. Προκαλείται πυρήνωση (nucleation) όταν το διάλυμα φτάσει σε ένα επίπεδο κρίσιμου κορεσμού και
- iii. Πραγματοποιείται αυθόρμητη ανάπτυξη κρυστάλλων στους σταθερούς πυρήνες.

Υπάρχουν πολυάριθμα είδη βακτηρίων που δύνανται να προκαλέσουν καθίζηση  $\text{CaCO}_3$  μέσω της ουρεολυτικής τους δράσης. Τα βακτήρια με αυτή τη δυνατότητα βρίσκονται σε ποικίλα περιβάλλοντα πέραν των εδαφών, όπως στους ωκεανούς και σε λίμνες και, πολλά εξ αυτών, παίζουν καθοριστικό ρόλο στον βιο-γεωχημικό κύκλο του ασβεστίου, ο οποίος ευθύνεται για την παραγωγή ιζημάτων ανθρακικού ασβεστίου και φυσικών τιμμεντοποιημένων εδαφών (Wei et al. 2015). Μεταξύ των βακτηριακών αυτών ειδών, αναφέρονται τα κυανοβακτήρια, τα θειοαναγωγικά βακτήρια, τα *Bacillus* βακτήρια, τα *Mycococcus* βακτήρια, τα *E. Coli* και τα *Pseudomonas* (Kammenaya et al. 2012; Ma et al. 2020). Το βακτήριο *Sporosarcina pasteurii* θεωρείται από τα πλέον κατάλληλα για εφαρμογή στα πλαίσια της βιο-ενίσχυσης (Mitchell & Santamarina 2005; DeJong et al. 2006; van Paassen et al. 2010). Είναι επίσης γνωστό και με το όνομα *Bacillus pasteurii*, *B. pasteurii* (παλαιότερη ονομασία) και βρίσκεται σε αφθονία στα εδάφη. Πρόκειται για ένα αλκαλόφιλο, θετικό κατά Gram βακτήριο, με ραβδοειδές σχήμα, διάμετρο ίση περίπου με  $1\mu\text{m}$  και μήκος περίπου  $3-5\mu\text{m}$  (Yoon et al. 2001). Χαρακτηρίζεται ως μη παθογόνος και μη τροποποιημένος μικροοργανισμός, με υψηλή ουρεολυτική δραστηριότητα (Whiffin et al. 2005).



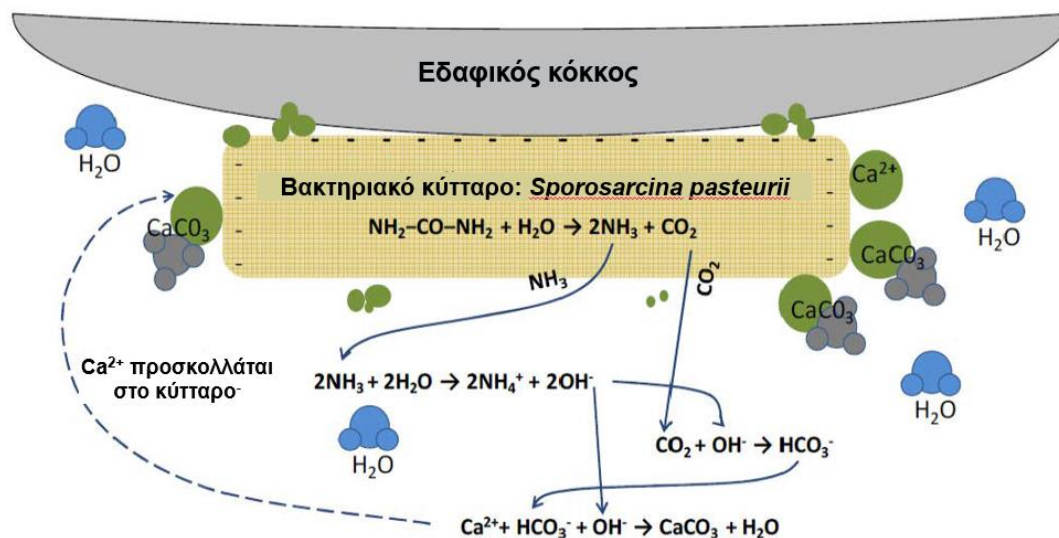
Σχήμα 1 Απλοποιημένη αναπαράσταση της διαδικασίας καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου ως αποτέλεσμα ουρεολυτικής δράσης βακτηρίων: Πρόσληψη ουρίας,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  από τα βακτηριακά κύτταρα και απελευθέρωση αμμωνίου (AMM) και διαλυμένου ανόργανου άνθρακα (DIC). Η παρουσία κατιόντων ασβεστίου (Ca) οδηγεί σε καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου,  $\text{CaCO}_3$  (τροπ. από De Muynck et al. 2010)

Η δράση του *Sporosarcina pasteurii* αναλύεται ως εξής: μέσα σε ένα αμμώδες έδαφος, η αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια του βακτηρίου προσκολλάται στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων. Το βακτήριο μεταβολίζει ουρία και απελευθερώνει αμμωνία,  $\text{NH}_3$  και διοξείδιο του άνθρακα,  $\text{CO}_2$ , Σχήμα 2, με αποτέλεσμα την καθίζηση  $\text{CaCO}_3$ , παρουσία μίας πηγής ασβεστίου, συννηθέστερα χλωριούχου ασβεστίου,  $\text{CaCl}$ . Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα ουρεολυτικά είδη βακτηρίων, το *Sporosarcina pasteurii* παράγει τα υψηλότερα ποσοστά ουρεάσης και ως εκ τούτου προκαλεί τη μεγαλύτερη καθίζηση  $\text{CaCO}_3$  (Terzis & Laloui 2019). Επιπλέον, σύμφωνα με τους Ma et al. (2020), τα *Sporosarcina pasteurii* ευνοούν τη δέσμευση των κατιόντων ασβεστίου με το υψηλό αρνητικό φορτίο της κυτταρικής επιφάνειάς τους, ενώ η χαμηλή τους κινητικότητα τα καθιστούν ιδανικές θέσεις πυρήνωσης.

Τα κυριότερα προβλήματα που παρουσιάζει η διαδικασία της εισαγωγής βακτηρίων, συννηθέστερα του *Sporosarcina pasteurii*, σε ένα έδαφος για την βιο-ενίσχυσή του, έχουν να κάνουν με την ικανότητα του βακτηρίου να επιβιώσει και να αναπτυχθεί σε ένα νέο εδαφικό περιβάλλον (Jiang et al. 2021), εξαιτίας πιέσεων που δέχονται από αβιοτικούς παράγοντες (pH, θερμοκρασία, ωσμωτικές πιέσεις και διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών), ή του ανταγωνισμού με αυτόχθονους μικροοργανισμούς. Επιπλέον, η εισαγωγή των βακτηρίων στο έδαφος μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα διηθησιμότητας, εξαιτίας του σχετικά μεγάλου μεγέθους τους, ειδικά σε πολύ λεπτόκοκκα εδάφη (Stocks-Fischer et al. 1999).



Εκτός από το *Sporosarcina pasteurii*, πρόσφατες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη βιο-διέγερση αυτόχθονων βακτηρίων που προ-υπάρχουν στο υπό βελτίωση έδαφος (Burbank et al. 2011). Η αποτελεσματικότητα των εν λόγω βακτηρίων καθιστά την όλη διαδικασία της βιο-ενίσχυσης ακόμη πιο φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν διαταράσσεται η βιο-ποικιλότητα, ενώ ταυτόχρονα αποφεύγονται προβλήματα διηθησιμότητας. Εξάλλου, οι μικρο-οργανισμοί που μπορούν να υδρολύσουν την ουρία σε διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία, εμφανίζονται σε μεγάλη αφθονία στα εδάφη, σε ποσοστά 17-30% των καλλιεργήσιμων αερόφιλων, μικρο-αερόφιλων και αναερόβιων μικρο-οργανισμών (Lloyd & Sheaffe 1973). Το ζητούμενο σε αυτή την περίπτωση είναι η διαθεσιμότητα τέτοιων βακτηρίων στο υπό βελτίωση έδαφος και η δραστηριότητά τους (Burbank et al. 2011).



Σχήμα 2 Απεικόνιση της ουρεολυτικής δράσης του βακτηρίου *Sporosarcina pasteurii* στο έδαφος, με αποτέλεσμα την καθίζηση  $\text{CaCO}_3$  (τροπ. από Montoya 2008)

### 3.2 Η τεχνική MICP

Η συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών μελετών επιδίωξε την εφαρμογή της τεχνικής MICP (Microbially Induced Carbonate Precipitation) σε καθαρές άμμους και σε άμμους με παρουσία χαλίκων. Μεταξύ των ελάχιστων προς το παρόν εξαιρέσεων, οι Gomez & DeJong (2017) και οι Zamani & Montoya (2018) απέδειξαν την αποτελεσματικότητα της MICP σε άμμους με παρουσία λεπτοκόκκων έως και 35%, ενώ οι Chittoori et al. (2020) επιχείρησαν αποτελεσματικά την εφαρμογή της MICP σε διογκούμενες αργίλους.

Σε κάθε περίπτωση, η MICP περιλαμβάνει τη βιο-ανάπτυξη ή βιο-διέγερση ουρεολυτικών βακτηρίων (DeJong et al. 2013), με σκοπό την αξιοποίηση του ενζύμου της ουρεάσης για την κατάλυση της υδρόλυσης της ουρίας και τελικώς την καθίζηση  $\text{CaCO}_3$  στον σκελετό του εδάφους, παρουσία πηγής ασβεστίου. Η παρουσία του  $\text{CaCO}_3$ , ως αποτέλεσμα της MICP, ποικίλλει σε ποσοστά κατά βάρος του ξηρού βελτιωμένου εδάφους, αναλόγως του σκοπού της εφαρμογής. Συνηθέστερα αναφέρονται ποσοστά μεταξύ 0.6 και 25% (Terzis & Laloui 2019).

Στην περίπτωση της βιο-ανάπτυξης, η διαδικασία εφαρμογής της MICP περιλαμβάνει τα εξής 5 στάδια, A-E (Cheng 2012):

- A. Καλλιέργεια των κατάλληλων τύπων ουρεολυτικών βακτηρίων στο εργαστήριο, υπό ελεγχόμενες (πχ. ασυπτικές) συνθήκες.

Η καλλιέργεια πραγματοποιείται σε θρεπτικό μέσο, αποτελούμενο από συστατικά που προσφέρουν την απαραίτητη ενέργεια για τη διατήρηση, την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό των βακτηρίων.

- Β.** Έγχυση του αιωρήματος ουρεολυτικών βακτηρίων και των λοιπών απαραίτητων χημικών διαλυμάτων στο έδαφος και μεταφορά τους στη θέση του υπό βελτίωση εδάφους μέσω διήθησης με χαμηλή υδραυλική κλίση.

Το αιώρημα των ουρεολυτικών βακτηρίων αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως βακτηριακό αιώρημα (ή διάλυμα), ενώ τα χημικά διαλύματα (chemical solutions) αναφέρονται ως αντιδραστήρια (reagents) ή αιωρήματα (ή διαλύματα) τσιμεντοποίησης (cementation solutions). Αυτά περιέχουν συνηθέστερα ουρία και χλωριούχο ασβέστιο,  $\text{CaCl}_2$ . Η έγχυση των χημικών διαλυμάτων και του αιωρήματος των βακτηρίων μπορεί να γίνει σταδιακά, ταυτόχρονα, ή ακόμα και με ανάμειξή τους πριν την εισαγωγή στο υπό βελτίωση έδαφος (Yu et al. 2022). Επίσης, η έγχυση στο πεδίο μπορεί να γίνει είτε από ειδικά διαμορφωμένα φρεάτια με εφαρμογή πίεσης με περισταλτική αντλία, ανάλογης της επιθυμητής ταχύτητας ροής και του ζητούμενου βάθους βελτίωσης, είτε με επιφανειακή διήθηση, ή με συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Στην πρώτη περίπτωση, είναι δυνατή η βιο-ενίσχυση εδάφους κάτω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Στη δεύτερη περίπτωση, η διήθηση μπορεί να γίνει με άρδευση ψεκασμού (Cheng & Cord 2014), με αποτέλεσμα τη βιο-ενίσχυση ακόμη και ξηρών εδαφών, πάνω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Ο Cheng (2012) αναφέρει ότι σε κάθε περίπτωση, η μέγιστη αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξασφαλίζεται με την έγχυση πρώτα του αιωρήματος ουρεολυτικών βακτηρίων, την εγκατάστασή τους στην επιθυμητή θέση βελτίωσης και ακολούθως την έγχυση διαλύματος ουρίας και χλωριούχου ασβεστίου.

- Γ.** Δημιουργία υπέρκορων συνθηκών μέσω της συνεχούς παροχής αιωρήματος ουρεολυτικών βακτηρίων και διαλύματος τσιμεντοποίησης (διαλύματος ουρίας και πηγής ασβεστίου), για την πρόκληση της καθίζησης  $\text{CaCO}_3$ .

Τα στάδια (Β) και (Γ) αποτελούν έναν κύκλο MICP.

- Δ.** Συνεχής παροχή των παραπάνω διαλυμάτων, αύξηση δηλαδή των κύκλων MICP, για τη συνέχιση της πρόκλησης καθίζησης  $\text{CaCO}_3$ , καθώς η διαδικασία της βιο-τσιμεντοποίησης οδηγεί σταδιακά σε μείωση της ουρεολυτικής δραστηρότητας.

Η συνέχιση της παροχής των παραπάνω διαλυμάτων οδηγεί σε αύξηση της ποσότητας του παραγόμενου  $\text{CaCO}_3$  και συνεπώς σε μεγαλύτερο βαθμό τσιμεντοποίησης. Για λόγους οικονομίας, είναι επιθυμητή η ανακύκλωση των διαλυμάτων έγχυσης, με συλλογή της ποσότητας που διαπερνά την επιθυμητή περιοχή βελτίωσης από μία θέση εξόδου και επανέγχυσή της στο έδαφος. Η θέση εξόδου στο πεδίο μπορεί να είναι το ένα από τα δύο φρεάτια έγχυσης, Σχήμα 3, ή ένα δίκτυο στράγγισης κάτω από την περιοχή βελτίωσης. Στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου στο εργαστήριο, η θέση εξόδου είναι η αντίθετη της επιφάνειας του δοκιμίου στην οποία γίνεται έγχυση των διαλυμάτων.

- Ε.** Απομάκρυνση των υπολειπόμενων διαλυμάτων, μετά την επίτευξη της επιθυμητής ποσότητας τσιμεντοποίησης.

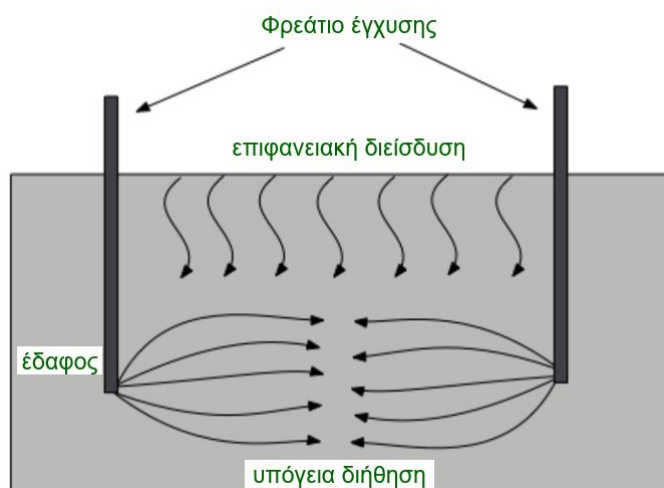
Η απομάκρυνση των διαλυμάτων μετά την ολοκλήρωση του τελικού κύκλου MICP εξασφαλίζει την ελάχιστη πρόκληση διατάραξης της μεθόδου στο περιβάλλον έδαφος.

Στην περίπτωση της βιο-διέγερσης, παραλείπεται το στάδιο εισαγωγής του αιωρήματος ουρεολυτικών βακτηρίων, καθώς αυτά προϋπάρχουν στο υπό βελτίωση έδαφος.

Αναλόγως του επιθυμητού βαθμού τσιμεντοποίησης, η διαδικασία εφαρμογής της MICP μπορεί να κυμαίνεται από κάποιες ώρες έως λίγες ημέρες (Terzis & Laloui 2019). Επιπλέον, το χαμηλό ιξώδες και η μεγάλη ευκολία παρασκευής των διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται στην MICP εξασφαλίζουν την εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο με χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και συνεπώς με χαμηλό κόστος εφαρμογής (Mujah et al. 2016; Terzis & Laloui 2019). Η MICP θεωρείται ένας μη παρεμβατικός μηχανισμός έγχυσης, ο οποίος διατηρεί ακέραιη την αρχική χωρική κατάσταση του εδάφους.



Μέχρι σήμερα, οι μελέτες που έχουν δημοσιευτεί με αντικείμενο την εφαρμογή της MICP στα πλαίσια της βιο-ενίσχυσης εδαφών, προτείνουν διαφορετικές μεταξύ τους «συνταγές» για τη βιο-διέγερση ή τη βιο-ανάπτυξη βακτηρίων και την πρόκληση καθίζησης  $\text{CaCO}_3$ . Οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις αναφέρονται στην ακριβή σύσταση του θρεπτικού μέσου, στη διαδικασία επώασης των βακτηρίων, την ακριβή σύσταση των τελικών διαλυμάτων, τον ρυθμό και τον τρόπο έγχυσης των διαλυμάτων στο έδαφος, καθώς και τον χρόνο δράσης τους (Jiang et al. 2021). Στην πλειοψηφία τους οι σχετικές μελέτες εφάρμοσαν την τεχνική της βιο-ανάπτυξης και χρησιμοποίησαν τα βακτήρια *Sporosarcina pasteurii*, τα οποία είναι διαθέσιμα από τον μη-κερδοσκοπικό οργανισμό συλλογής μικροβιακών καλλιεργειών, ATCC της Αμερικής (πρωτόκολλο ATCC 11859) (Lin et al. 2016; Mahawish et al. 2018; Ding et al. 2019; Peng & Liu 2019 και άλλοι) ή από τον αντίστοιχο οργανισμό DSMZ στη Γερμανία (DSMZ 33) (Liu et al. 2019; Wang et al. 2020 και άλλοι). Σε κάθε περίπτωση, η καταλληλότητα των προτεινόμενων διαδικασιών της MICP και των συστατικών της εξαρτάται από την ικανότητα πρόκλησης ομοιογενούς καθίζησης της επιθυμητής ποσότητας  $\text{CaCO}_3$ , στην κατά το δυνατό μεγαλύτερη χωρική απόσταση (van Paassen et al. 2010).



Σχήμα 3 Σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής της MICP με υπόγεια εφαρμογή ή/και επιφανειακή διήθηση των εναιωρημάτων ουρεολυτικών βακτηρίων και των διαλυμάτων ουρίας και πηγής ασβεστίου (τροπ. από Cheng 2012)

### 3.3 Πεδία εφαρμογής της βιο-ενίσχυσης

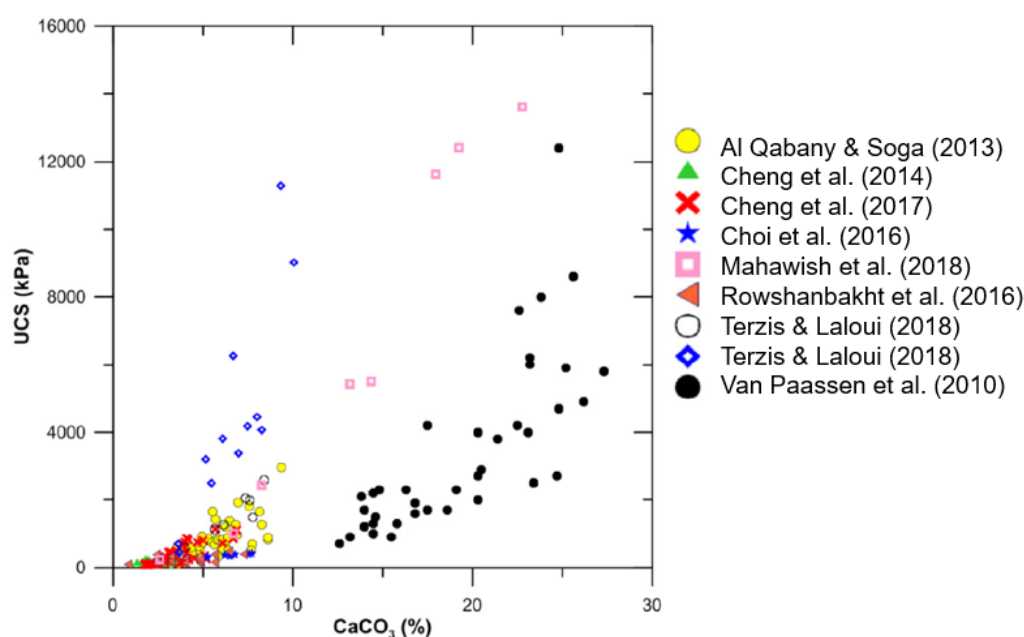
Η βιο-ενίσχυση βρίσκει εφαρμογές σε ποικίλα προβλήματα σχετιζόμενα με τη συμπεριφορά των εδαφών. Από μηχανικής άποψης, η αύξηση της αντοχής των βιο-ενισχυμένων εδαφών επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου ως τεχνική βελτίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς προβληματικών εδαφών κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή τεχνικών έργων, κατά την αντιμετώπιση γεωτεχνικών προβλημάτων, μεταξύ των οποίων οι διαφορικές καθιζήσεις, οι κατολισθήσεις και το φαινόμενο της ρευστοποίησης, καθώς και κατά τη συμπύκνωση εδαφών για την αποφυγή της διάβρωσής τους ή για καλλιεργητικούς σκοπούς. Από φυσικής άποψης, τα χαρακτηριστικά διαπερατότητας των βιο-ενισχυμένων εδαφών μπορούν να αξιοποιηθούν σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών, μεταξύ των οποίων σε προβλήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης και αποκατάστασης εδαφών, καθώς και σε γεωργικές εφαρμογές, σχετιζόμενες με τη στράγγιση και τη μεταβολή του πορώδους καλλιεργήσιμων εδαφών. Επιπλέον, η ριζική μεταβολή των ιδιοτήτων των βιο-ενισχυμένων εδαφών σε μικρο- και μακρο-σκοπική κλίμακα, επιτρέπει την αξιοποίησή τους ως νέα γεω-υλικά για σκοπούς δόμησης ή αποκατάστασης υπαρχόντων προβληματικών εδαφών.

Ακολουθεί η ανάλυση των σημαντικότερων πεδίων εφαρμογής της βιο-ενίσχυσης, σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι βασικές ιδιότητες των βιο-ενισχυμένων εδαφών, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της καταλληλότητας της μεθόδου στα παραπάνω πεδία εφαρμογών.

### Βελτίωση της αντοχής εδαφών

Η συντριπτική πλειοψηφία των μελετών εφαρμογής της MICP στη διεθνή βιβλιογραφία έχει σκοπό τη βελτίωση της αντοχής των εδαφών, ώστε να είναι δυνατή η παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων από υπάρχουσες ή υπό κατασκευή ανωδομές και να αποφευχθεί ο κίνδυνος αστοχίας γεω-κατασκευών. Μάλιστα, οι Xiao et al. (2019) αναφέρουν ότι η βιο-τσιμεντοποίηση οδηγεί σε μεγαλύτερη βελτίωση της αντοχής αμμωδών εδαφών, σε σύγκριση με τη συμπύκνωσή τους. Σύμφωνα με τους Cheng et al. (2016), η βελτίωση της αντοχής και της ακαμψίας ως αποτέλεσμα της βιο-ενίσχυσης αποδίδεται στη (μερική ή ολική) πλήρωση των κενών των πόρων του εδάφους με κρυστάλλους  $\text{CaCO}_3$ , οι οποίοι λειτουργούν ως «ενεργές γέφυρες» μεταξύ των εδαφικών κόκκων και συμβάλλουν στην παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων από τον νέο εδαφικό σκελετό.

Οι εργαστηριακές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί για τους παραπάνω σκοπούς, περιλαμβάνουν πρωτίστως δοκιμές αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη (Gomez & DeJong 2017; Mahawish et al. 2018), καθώς αποτελούν την πλέον γρήγορη, απλή και οικονομική δοκιμή για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής συνεκτικών εδαφών. Οι Terzis & Laloui (2019) αναφέρουν ότι τα δοκίμια άμμου, μετά τη βιο-τσιμεντοποίησή τους και την καθίζηση  $\text{CaCO}_3$  σε ποσοστό κατά βάρος του ξηρού εδάφους έως και 25%, αποκτούν τιμές συνοχής της τάξης των 100kPa και τιμές αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη, UCS (unconfined compressive strength), έως και 1400kPa, Σχήμα 4. Οι τιμές UCS στη βιβλιογραφία ποικίλουν σημαντικά, αναλόγως του τύπου των μελετηθέντων εδαφών, της διαδικασίας εφαρμογής της βιο-τσιμεντοποίησης και της ζητούμενης παραγωγής  $\text{CaCO}_3$ . Η Whiffin (2004) αναφέρει χαρακτηριστικά ένα εύρος τιμών UCS μεταξύ 15kPa και 35MPa, το οποίο προκύπτει από διαφορετικές διαδικασίες εφαρμογής της MICP. Οι Mahawish et al. (2018) αναφέρουν ότι απαιτείται η επίτευξη τουλάχιστον 2.6% κατά βάρος συγκέντρωσης  $\text{CaCO}_3$  σε μία χονδρόκοκκη άμμο, για τη βελτίωση της μηχανικής της συμπεριφοράς.



Σχήμα 4 Τιμές αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη, UCS, βελτιωμένων αμμωδών εδαφών με διάφορα ποσοστά  $\text{CaCO}_3$  κατά βάρος του ξηρού εδαφικού δοκίμιου (τροπ. από Terzis & Laloui 2019)

### Αποτροπή ρευστοποίησης

Η ρευστοποίηση είναι το φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου κορεσμένα κοκκώδη εδάφη υφίστανται σημαντική απομείωση της διατμητικής αντοχής και της ακαμψίας τους, ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης, που προκαλείται κατά τη στατική (μονοτονική) ή ανακυκλική φόρτισή τους υπό

αστράγγιστες συνθήκες και της ανάπτυξης υπερπιέσεων του νερού των πόρων (Seed 1979). Η ρευστοποίηση, η οποία συνηθέστερα εμφανίζεται ως αποτέλεσμα σεισμικής (ανακυκλικής) φόρτισης, ιδιαίτερα διαδεδομένης στην Ελλάδα, αποτελεί μία από τις κυριότερες αιτίες αστοχίας του εδάφους θεμελίωσης των γεωκατασκευών και των θεμελιώσεων των τεχνικών έργων. Καθώς η διαθεσιμότητα κατάλληλων θέσεων κατασκευής μειώνεται, η ανάγκη βελτίωσης γενικά των εδαφικών συνθηκών διαρκώς αυξάνεται. Σε θέσεις νέων κατασκευών, η αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης κοκκωδών εδαφών δεν παρουσιάζει συνήθως τεχνικά προβλήματα και γίνεται επιλέγοντας από μια σειρά καθιερωμένων μεθοδολογιών που στηρίζονται στη συμπύκνωση, στη σταθεροποίηση ή την αποτόνωση των υπερπιέσεων του ύδατος των πόρων. Ωστόσο, στην περίπτωση που απαιτείται η βελτίωση εδάφους έναντι ρευστοποίησης υφιστάμενων κατασκευών, οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους, όπως η δυναμική συμπύκνωση, η αντικατάσταση ή η βαθιά εδαφική ανάμειξη, είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθούν χωρίς συνέπειες στη λειτουργικότητά τους ή την πιθανότητα εμφάνισης δομικών αστοχιών κατά την εφαρμογή δυναμικών ή δονητικών τεχνικών (Vranna et al. 2020a). Για το λόγο αυτό, κατά τη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών γίνεται συνήθως εφαρμογή μεθόδων όπως η τοποθέτηση μικροπασσάλων, η εισπίεση ενεμάτων μεγάλου ιξώδους μέσω γεωτρήσεων και η χρήση στραγγιστηρίων για την εκτόνωση της πίεσης του ύδατος των πόρων. Στις περισσότερες περιπτώσεις ωστόσο, η χρήση των παραπάνω τεχνικών απαιτεί υψηλό κόστος και οδηγεί σε τοπική μόνον βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης, ενώ παρεμποδίζεται η κανονική λειτουργία της κατασκευής κατά τη διάρκεια των εργασιών (Βράννα 2016). Η βιο-ενίσχυση, ως τεχνική αποτροπής τους κινδύνου ρευστοποίησης επιφανειακών κορεσμένων κοκκωδών εδαφών, φαίνεται πως οδηγεί σε μη-τοπικού χαρακτήρα βελτίωση του εδάφους, δεν προκαλεί όχληση στη λειτουργία των υφιστάμενων κατασκευών κατά τη φάση εφαρμογής, και, πρωτίστως, αποτελεί μία περιβαλλοντικά φιλική και βιώσιμη λύση για την αποφυγή εμφάνισης ρευστοποίησης (Mitchell & Santamarina 2005). Το εν λόγω πεδίο εφαρμογής έχει διερευνηθεί πειραματικά μέχρι στιγμής από περιορισμένο αριθμό μελετών (Montoya et al. 2013; Cheng et al. 2013; Han et al. 2016; Xiao et al. 2018), εξαιτίας της πολυπλοκότητας της φύσης των δοκιμών.

#### Βιο-απόφραξη και στεγανοποίηση

Σύμφωνα με τους Mujah et al. (2016), η τεχνική MICP μπορεί να εφαρμοστεί με σκοπό την αύξηση της αντοχής του εδάφους και ταυτόχρονα, είτε τη διατήρηση της αρχικής διαπερατότητας, ή την απόφραξη των πόρων του εδάφους και τη σημαντική απομείωση της διαπερατότητάς του. Στην πρώτη περίπτωση, η καθίζηση του  $\text{CaCO}_3$  δεν λαμβάνει χώρα στο σύνολο του εδαφικού πορώδους, παρά μόνον στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων. Αυτή η ιδιότητα της βιο-τσιμεντοποίησης βρίσκει εφαρμογές στην περίπτωση όπου είναι επιθυμητή η αύξηση της αντοχής του εδάφους, όχι όμως η μεταβολή της διαπερατότητάς του. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η περίπτωση της βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών, όπου είναι επιθυμητή η εκτόνωση των υδατικών υπερπιέσεων, και της διαχείρισης προβληματικών αγροτικών εδαφών, για τα οποία ζητείται η αύξηση της σταθερότητάς τους, η επαρκής στράγγιση και ο αερισμός τους. Η ιδιότητα αυτή της διατήρησης του πορώδους και της διαπερατότητας του εδάφους είναι λιγότερο έκδηλη με την εφαρμογή τεχνητής τσιμεντοποίησης με προσθήκη τσιμέντου (Cheng et al. 2013) και δε συμβαίνει καθόλου στην περίπτωση της χημικής ενεμάτωσης (Gallagher 2000).

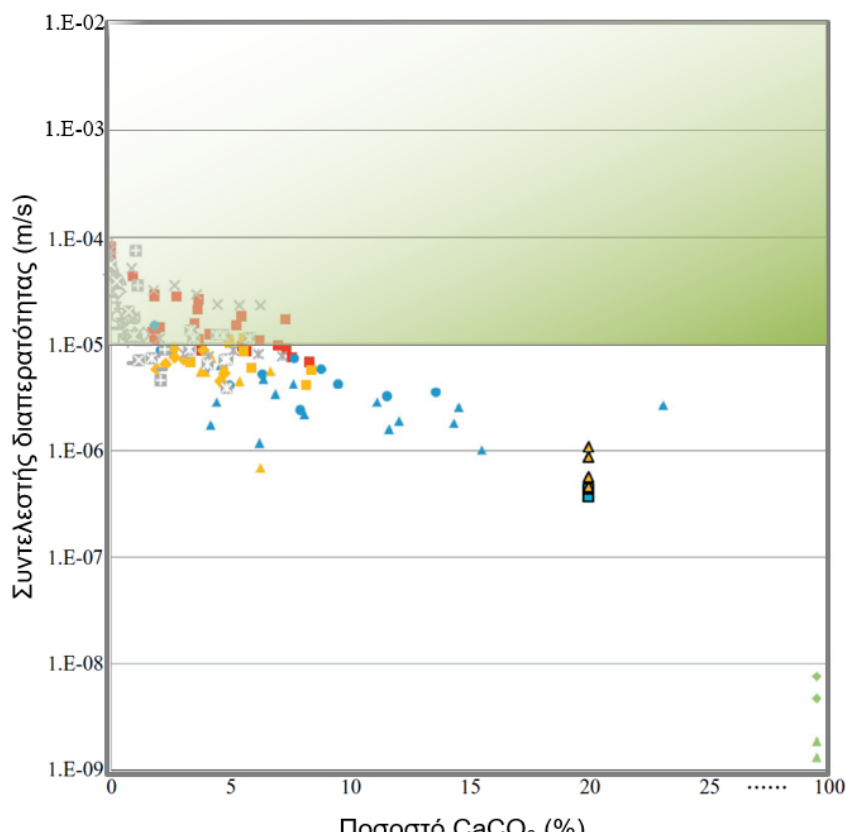
Η βιο-ενίσχυση μπορεί να εφαρμοστεί όμως και με τρόπο που να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της διαπερατότητας του βελτιωμένου εδάφους. Συγκεκριμένα, εφόσον το έδαφος είναι κορεσμένο και εφαρμόσουν πολλοί κύκλοι MICP, οι κρύσταλλοι  $\text{CaCO}_3$  μπορούν να γεμίσουν σχεδόν το σύνολο των εδαφικών πόρων, με αποτέλεσμα την απόφραξή τους και τη μειωμένη διαπερατότητα του εδάφους. Ως εκ τούτου, αναλόγως του επιθυμητού αποτελέσματος, η απομείωση της διαπερατότητας και του πορώδους των βιο-τσιμεντοποιημένων εδαφών ποικίλλει (Σχήμα 5) και μπορεί να φτάσει έως και 99% (Ivanov et al. 2010) στην περίπτωση μεγάλου βαθμού τσιμεντοποίησης, λειτουργώντας όπως η τεχνική της βιο-απόφραξης. Η ιδιότητα αυτή των βιο-ενισχυμένων εδαφών βρίσκει ποικίλες εφαρμογές, μεταξύ των οποίων ο περιορισμός της διαρροής υγρών αποβλήτων και επικίνδυνων

υδαρών ουσιών, όπως του πετρελαίου, η στεγανοποίηση εδαφικών στρώσεων για γεωτεχνικούς ή και καλλιεργητικούς σκοπούς και η προστασία από την εσωτερική διάβρωση (Castaner et al. 1999; Ivanov & Chu 2008).

#### Σταθεροποίηση πρανών και προβληματικών εδαφών

Η σταθεροποίηση πρανών αποσκοπεί στην αποτροπή της ολίσθησης ή αποκόλλησης μέρους πρανών, όταν οι δυνάμεις αστάθειας υπερβούν τις δυνάμεις ευστάθειας. Η σταθεροποίηση πρανών εξασφαλίζει την απομείωση του κινδύνου επιφανειακής διάβρωσης, γεγονός που ενδιαφέρει όχι μόνο τους μηχανικούς αλλά και τους γεωπόνους. Για τους σκοπούς της σταθεροποίησης χαλαρών αμμωδών αποθέσεων, η τεχνητή τσιμεντοποίηση, καθώς και η χημική ενεμάτωση, έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία (Gallagher 2000), αποδεικνύοντας ότι η δημιουργία συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των εδαφικών κόκκων βελτιώνει την ευστάθεια των εδαφών. Η βιο-ενίσχυση, ως μία βιώσιμη και «πράσινη» εναλλακτική της τεχνητής τσιμεντοποίησης, φαίνεται πως μπορεί να οδηγήσει σε εξίσου θετικά αποτελέσματα (Cheng 2012; DeJong et al. 2013).

Εκτός των πρανών, η σταθεροποίηση αναφέρεται και στην περίπτωση εδαφών που υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις υπό την επίδραση παραγόντων, όπως της μεταβολής της υγρασίας ή της επιβολής φόρτισης. Σε αυτή την κατηγορία εδαφών ανήκουν και τα διογκούμενα εδάφη. Πρόκειται για εδάφη με μεγάλο ποσοστό λεπτοκόκκων και υψηλές τιμές πλαστικότητας, τα οποία περιλαμβάνουν διογκούμενα αργιλικά ορυκτά, όπως μοντμοριλλονίτη. Οι μεταβολές της υγρασίας στα εν λόγω εδάφη προκαλούν σημαντικές μεταβολές του όγκου τους, οι οποίες οδηγούν συχνά σε γεωτεχνικές αστοχίες. Η χημική ενεμάτωση, η τεχνητή τσιμεντοποίηση, ή η βαθιά δονητική συμπύκνωση αυτών των εδαφών αποτελούν μερικές από τις συνήθεις τεχνικές βελτίωσής τους. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Chittoori et al. (2020) πρότειναν τη βιο-ενίσχυση διογκούμενης αργίλου υψηλής πλαστικότητας, με εφαρμογή της MICP για τη σταθεροποίησή της στο πεδίο.



Σχήμα 5 Τιμές διαπερατότητας βιο-τσιμεντοποιημένων άμμων της βιβλιογραφίας, για διάφορα ποσοστά κατά βάρος  $\text{CaCO}_3$  (τροπ. από Chu et al. 2015). Η πράσινη περιοχή παρουσιάζει τις συνήθεις τιμές διαπερατότητας καθαρών άμμων.  $10^{-2}$  -  $10^{-5} \text{ m/s}$

### Περιορισμός εδαφικής διάθρωσης και διάχυσης σκόνης

Η παρατηρηθείσα αυξημένη συνοχή και διατμητική αντοχή των βιο-ενισχυμένων εδαφών, καθώς και η απομείωση της διαπερατότητάς τους, υποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα εφαρμογής της μεθόδου για προστασία από τη διάβρωση και τη διάχυση σκόνης (dust abatement), καθώς και για επανακαλλιέργεια (re-vegetation) εδαφών. Η διερεύνηση της εν λόγω εφαρμογής της βιο-ενίσχυσης αποτέλεσε αντικείμενο πρόσφατων μελετών, με θετικά αποτελέσματα (Gomez et al. 2015; Imran et al. 2019; Do et al. 2019; Meng et al. 2020; Dubey et al. 2021).

### Βιο-αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών

Η βιο-ενίσχυση μπορεί επίσης να εφαρμοστεί με σκοπό την απομείωση της βιο-διαθεσιμότητας μετάλλων σε ρυπασμένα εδάφη. Οι Kumari et al. (2016) αναφέρουν ότι η διαδικασία της MICP μπορεί να προκαλέσει ακινητοποίηση των βαρέων μετάλλων που υπάρχουν στο έδαφος, με πρόκληση άμεσης καθίζησής τους σε μία αδιάλυτη μορφή ανθρακικών μετάλλων, ή με αντικατάστασή τους στη θέση του ασβεστίου που χρησιμοποιείται στην τυπική διαδικασία MICP, κατά την καθίζηση  $\text{CaCO}_3$ . Πέραν της βιο-αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών, έχουν γίνει επίσης προσπάθειες εφαρμογής της MICP για την βιο-απομάκρυνση τοξικών μετάλλων από υγρά απόβλητα (Torres-Aravena et al. 2016).

Πέραν των ανωτέρω πεδίων εφαρμογών, υπάρχουν επίσης αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία για αποτελεσματική εφαρμογή της βιο-τσιμεντοποίησης με σκοπό την *αύξηση της εδαφικής θερμικής αγωγιμότητας* (Venuleo et al. 2016; Ding et al. 2019; Wang et al. 2020), κατά την αλληλεπίδραση εδάφους και συστημάτων αντλίας θερμότητας, ιδιαίτερα σε ακόρεστα εδάφη, όπου οι απώλειες ενέργειας είναι μεγαλύτερες. Επιπλέον, η ανάγκη εύρεσης τεχνικών αποκατάστασης των ρωγμών που διανοίγονται σε επιφάνειες δομικών υλικών, όπως τσιμέντου και μαρμάρου, και συχνά προκαλούν αστοχίες των κατασκευών ή καταστροφές μνημειακών έργων, οδήγησε στη διερεύνηση της καταλληλότητας της βιο-τσιμεντοποίησης για την *αυτο-ίαση των αστοχιών* τέτοιων υλικών, με θετικά αποτελέσματα (Jonkers et al. 2010; Botusharova et al. 2020; Chen et al. 2020). Σημειώνεται ότι η βιο-ενίσχυση έχει επίσης προταθεί και για τη δημιουργία νέων γεω-υλικών, καθώς και των λεγόμενων βιο-πλίνθων (*bio-bricks*), για αντικατάσταση των συνήθων υλικών τοιχοποιϊας σκυροδέματος, η κατασκευή των οποίων χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλο ανθρακικό αποτύπωμα (Lezzi et al. 2019). Τα *bio-bricks* μπορούν να διαμορφωθούν με την εφαρμογή πολλών κύκλων MICP σε δοκίμια άμμου (Bernandi et al. 2014; Dossier 2015).

## **3.4 Η συμπεριφορά των βιο-ενισχυμένων εδαφών**

Η απουσία μέχρι σήμερα τυποποιημένων διαδικασιών εφαρμογής της βιο-ενίσχυσης καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την ομαδοποίηση και συγκέντρωση των ιδιοτήτων των βιο-ενισχυμένων εδαφών. Η προκύπτουσα από τη βιο-τσιμεντοποίηση εδαφική δομή χαρακτηρίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις από μεγάλη ανισοτροπία (Terzis & Laloui 2019), η οποία καθορίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των βελτιωμένων εδαφών. Οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με την ομοιόμορφη απομείωση του πορώδους (Ivanov et al. 2010; Kim et al. 2014) και την κατανομή όμοιου μεγέθους και τύπου κρυστάλλων  $\text{CaCO}_3$  (Plummer & Busenberg 1982; Anbu et al. 2016) στον εδαφικό σκελετό κατά την εφαρμογή της βιο-ενίσχυσης, ενισχύουν σημαντικά την πιθανότητα αύξησης της ανισοτροπίας στα βιο-ενισχυμένα εδάφη.

Ωστόσο, η πλειοψηφία των ερευνών, ανεξαρτήτως της προκύπτουσας ανισοτροπίας, αναφέρει μία εν γένει μεγάλη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων ποικίλων τύπων εδαφών μετά τη βιο-ενίσχυσή τους, η οποία αποδίδεται στη δημιουργηθείσα μικροδομή. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Cheng et al. (2013), η βελτίωση της αντοχής των βιο-τσιμεντοποιημένων άμμων αποδίδεται στους κρυστάλλους  $\text{CaCO}_3$  που δημιουργήθηκαν στους πόρους του εδάφους και ενώνουν ως «ενεργές γέφυρες» τους



εδαφικούς κόκκους μεταξύ τους. Αντιθέτως, οι υπόλοιποι κρύσταλλοι που δε βρίσκονται στα σημεία επαφής των κόκκων, δε συμμετέχουν πρακτικά στην ανάληψη φορτίων. Ομοίως, η μικροσκοπική ανάλυση της δομής των βιο-τσιμεντοποιημένων εδαφών από τους DeJong et al. (2010), έδειξε ότι οι κρύσταλλοι που καθιζάνουν στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων με αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους των κόκκων, λειτουργούν ως ασθενείς συγκολλητικοί δεσμοί μεταξύ των κόκκων, ενώ αντιθέτως οι κρύσταλλοι που καθιζάνουν στα σημεία επαφής μεταξύ γειτονικών κόκκων είναι αυτοί που συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της αντοχής των εδαφών. Σύμφωνα με τους Mujah et al. (2019), είναι σημαντικότερη η απόσταση μεταξύ των κόκκων που γεφυρώνεται από τους κρυστάλλους  $\text{CaCO}_3$ , παρά το μέγεθος των κρυστάλλων καθ' εαυτό. Οι ίδιοι ερευνητές παρατήρησαν επίσης ότι η ευνοϊκότερη βιο-ενίσχυση, αυτή που οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του εδάφους χωρίς σημαντική μείωση της διαπερατότητας, επιτυγχάνεται με συνδυασμό υψηλής συγκέντρωσης βακτηριακού αιωρήματος και χαμηλής συγκέντρωσης χημικού διαλύματος τσιμεντοποίησης, κατά την εφαρμογή της MICP.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του αντικειμένου, οι μελετηθείσες μηχανικές ιδιότητες που έχουν καταγραφεί αφορούν στις πλέον βασικές πληροφορίες μηχανικής συμπεριφοράς για ένα έδαφος, οι οποίες προσδιορίζονται με τις συμβατικές εργαστηριακές δοκιμές Εδαφομηχανικής (δοκιμές αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη, δοκιμές άμεσης διάτμησης και τριαξονικές δοκιμές μονοτονικής φόρτισης). Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν τις τιμές της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη, UCS, της συνοχής,  $c$ , της γωνίας τριβής,  $\phi$ , του μέτρου ελαστικότητας,  $E$  και του μέγιστου μέτρου διάτμησης,  $G_{\max}$  των βελτιωμένων εδαφών.

Οι φυσικές ιδιότητες των βιο-τσιμεντοποιημένων εδαφών αφορούν πρωτίστως στις μεταβολές δομικών ιδιοτήτων, όπως το πορώδες και η διαπερατότητά τους, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και τα πεδία εφαρμογής της βιο-ενίσχυσης. Η διαπερατότητα έχει υπολογιστεί κατά κύριο λόγο με δοκιμές διαπερατότητας σταθερού και μεταβλητού υδραυλικού φορτίου (Cheng et al. 2013; Gomez & DeJong 2017; Mahawish et al. 2018). Η απομείωση του πορώδους μπορεί να εκτιμηθεί ποσοτικά ως ίση με την αύξηση του βάρους του βελτιωμένου εδάφους εξαιτίας της καθίζησης σε αυτό κρυστάλλων  $\text{CaCO}_3$ , λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητά τους (συνηθέστερα  $2710 \text{ kg/m}^3$ ) (van Paassen 2009).

Τόσο το πορώδες όσο και η διαπερατότητα των βιο-ενισχυμένων εδαφών παρουσιάζουν εν γένει μείωση σε σύγκριση με τις αρχικές τους τιμές, ωστόσο η μείωση αυτή διαφέρει σημαντικά αναλόγως του επιθυμητού μεγέθους τσιμεντοποίησης (van Paassen 2009). Μεγαλύτερα ποσοστά βιο-ενίσχυσης οδηγούν σε μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις του πορώδους και της διαπερατότητας, τα οποία αναφέρεται ότι μπορούν να προκαλέσουν ακόμη και απόφραξη των εδαφικών πόρων σε πολύ μεγάλα ποσοστά παραγωγής  $\text{CaCO}_3$ .

Στους Πίνακες 8 και 9 παρουσιάζονται αντίστοιχα χαρακτηριστικές τιμές μηχανικών και φυσικών παραμέτρων βιο-ενισχυμένων εδαφών, όπως προέκυψαν από εργαστηριακές μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας.

*Πίνακας 8 Ενδεικτικά χαρακτηριστικά μηχανικών παραμέτρων βιο-ενισχυμένων αμμωδών εδαφών σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία*

Αναφορά	Έδαφος	Ποσοστό* βιο-τσιμεντοποίησης	Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, UCS (kPa)	Ακαμψία**
Cheng (2012), Cheng et al. (2016)	άμμοι διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και ομοιομορφίας	1-14%	έως 2500kPa	$E_s$ έως 180MPa
Terzis & Laloui (2019b)	λεπτόκοκκη ομοιόμορφη άμμος, μεσόκοκκη ομοιόμορφη άμμος, μείγμα χαλίκων-άμμου	3-10%	έως 11300kPa	$E_s$ έως 1974MPa

Duraisamy (2016); Duraisamy & Airey (2019)	ομοιόμορφη άμμος	0.26-9.34%	έως 950kPa	$G_{max}$ έως 1350MPa
Mahawish et al. (2018)	ομοιόμορφη άμμος	2.8-22%	200-16000kPa	$G_{max} = 259-3000MPa$
Mujah et al. (2019)	ομοιόμορφη άμμος	2-10%	έως 4100kPa	-

\*ποσοστό % κατά βάρος  $CaCO_3$  του ξηρού εδαφικού δοκιμίου

\*\* $E_i$  : αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας /  $E_s$  : μέτρο ελαστικότητας /  $G_{max}$  : μέγιστο μέτρο διάτμησης

Πίνακας 9 Ενδεικτικά χαρακτηριστικά φυσικών παραμέτρων βιο-ενισχυμένων αμμωδών εδαφών σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία

Αναφορά	Έδαφος	Ποσοστό / Μέγεθος βιο-τσιμ.	Διαπερατότητα	Πορώδες
Van Paassen (2009)	ομοιόμορφες χαλαζιακές και ασβεστολιθικές άμμοι	3.5%	μείωση έως 50%	Η απομείωση της διαπερατότητας κατά 50% δεν προκαλεί απόφραξη των πόρων
Cheng (2012), Cheng et al. (2016)	άμμοι διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων	έως 0.09g/g εδάφους	μπορεί να διατηρηθεί στα αρχικά επίπεδα ή να μειωθεί 30-80% της αρχικής τιμής, η απομείωση αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους βιο-τσιμ.	-
Mahawish et al. (2018)	ομοιόμορφη άμμος	2.8-22%	$3.76 \cdot 10^{-6} m/s$ (40% μείωση)	μείωση πορώδους με αύξηση ποσοστού τσιμ.
Mujah et al. (2019)	ομοιόμορφη άμμος	2-10%	υψηλές τιμές διαπερατότητας	-

### 3.5 Συσχέτιση της συμπεριφοράς βιο-ενισχυμένων και τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών

Η συμπεριφορά των βιο-ενισχυμένων άμμων βρίσκει σημαντικές ομοιότητες με την αντίστοιχη συμπεριφορά των τεχνητά τσιμεντοποιημένων άμμων, με προσθήκη τσιμέντου ή γύψου. Υπάρχει περιορισμένος σχετικά αριθμός σχετικών πειραματικών μελετών για την εκτίμηση της συμπεριφοράς βιο-ενισχυμένων εδαφών και αρκετές από αυτές παρουσιάζουν σύγκριση των αποτελεσμάτων της βιο-ενίσχυσης με τα αντίστοιχα της τεχνητής τσιμεντοποίησης. Ακολούθως, παρουσιάζονται ορισμένες μελέτες σύγκρισης, σε μικρο- και μακρο-σκοπικό επίπεδο, της συμπεριφοράς των δύο αυτών τύπων βελτιωμένων εδαφών.

Οι DeJong et al. (2006) διερεύνησαν τη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς μεταξύ τεχνητά τσιμεντοποιημένων άμμων με γύψο σε ποσοστό 5% κατά βάρος του ξηρού εδαφικού δοκιμίου, και βιο-τσιμεντοποιημένων άμμων, σε χαλαρή και πυκνή κατάσταση. Μακρο-σκοπικά, προέκυψαν παρόμοιες τιμές ταχύτητας διατμητικών κυμάτων και ως εκ τούτου παρόμοιες τιμές ακαμψίας, μεταξύ των δοκιμίων που βελτιώθηκαν με προσθήκη γύψου και των βιο-τσιμεντοποιημένων δοκιμίων. Παρόμοια ήταν και η μονοτονική συμπεριφορά των δύο τσιμεντοποιημένων άμμων. Οι Duraisamy (2015) και Duraisamy & Airey (2019) παρουσίασαν μία εκτεταμένη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς τεχνητά τσιμεντοποιημένων άμμων με γύψο σε ποσοστά 5-20%, και βιο-τσιμεντοποιημένων άμμων σε ποσοστά 0.5-10%. Προέκυψαν όμοιες τιμές αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη για βιο-τσιμεντοποιημένα δοκίμια με 2%  $CaCO_3$  και με 5% γύψο και παρόμοιες σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων για τους δύο τύπους βελτιωμένων εδαφών σε όλα τα μελετηθέντα ποσοστά γύψου / ασβεστίτη. Οι Mujah et al. (2019) μελέτησαν τη συμπεριφορά τεχνητά τσιμεντοποιημένων



άμμων με προσθήκη τσιμέντου Portland και βιο-τσιμεντοποιημένων άμμων, σε ποσοστά 2-10%. Προέκυψε ότι η βιο-ενίσχυση οδηγεί σε μικρή απομείωση της διαπερατότητας, έως 50%, διατηρώντας την σε σχετικά υψηλά επίπεδα, σε αντίθεση με την προσθήκη τσιμέντου, η οποία προκαλεί πολύ μεγάλη μείωση της διαπερατότητας, έως και 100%. Οι Vranna & Tika (2020b) εκτέλεσαν τριαξονικές δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης σε τσιμεντοποιημένα δοκίμια χαλαρής άμμου, με τσιμέντο Portland σε ποσοστό 3% κατά βάρος του ξηρού εδαφικού δοκιμίου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τους Montoya et al. (2013), για βιο-ενισχυμένες άμμους στο ίδιο ποσοστό  $\text{CaCO}_3$ , προέκυψε όμοια συμπεριφορά και ανακυκλική αντίσταση για τους δύο τύπους βελτιωμένων εδαφών.

## 4. Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΠΟΛΙΤΩΝ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 4.1 Ορισμός, Αρχές, Επίπεδα Συμμετοχής και Προκλήσεις

Με τον όρο επιστήμη των πολιτών (citizen science) αναφερόμαστε σε ένα ευρύ φάσμα εμπλοκής των πολιτών στην επιστημονική διαδικασία με ενεργό συμμετοχή σε ερευνητικά πεδία (Lewenstein, 2004). Οι πολίτες συμμετέχουν είτε ατομικά είτε ως μέλη μιας κοινότητας (Muki Haklay, 2018). Η έννοια εμφανίζεται για πρώτη φορά τον 19<sup>ο</sup> αιώνα χωρίς όμως ένα σαφή ορισμό και καθιερώνεται το 1990 (Vohland et al., 2021) (Vasiliades et al., 2021).

Οι δέκα αρχές της επιστήμης των πολιτών όπως ορίστηκαν από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Επιστήμη των Πολιτών, συμπληρώνουν τον ορισμό και δίνουν το πλαίσιο πάνω στο οποίο αναπτύσσεται η επιστήμη των πολιτών<sup>1</sup>. Συγκεκριμένα:

1. Τα προγράμματα (projects) της Επιστήμης του Πολίτη εμπλέκουν ενεργά τους πολίτες σε επιστημονικές προσπάθειες, οι οποίες παράγουν νέα γνώση ή αντίληψη. Οι πολίτες μπορούν να ενεργούν είτε ως συνεισφέροντες ή συνεργάτες, είτε ως επικεφαλής του προγράμματος και να έχουν ουσιαστικό ρόλο στο έργο.
2. Τα προγράμματα της Επιστήμης του Πολίτη έχουν αυθεντικά επιστημονικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, την απάντηση ενός ερευνητικού ερωτήματος, την ενημέρωση για τη διατήρηση του περιβάλλοντος, αποφάσεις διαχείρισης ή περιβαλλοντική πολιτική.
3. Τόσο οι επαγγελματίες επιστήμονες, όσο και οι πολίτες επιστήμονες επωφελούνται από τη συμμετοχή. Τα οφέλη μπορεί να συμπεριλαμβάνουν τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων της έρευνας, ευκαιρίες για μάθηση, προσωπική απόλαυση, κοινωνικά οφέλη, ικανοποίηση από τη συνεισφορά σε επιστημονικές αποδείξεις π.χ. την αντιμετώπιση των τοπικών, εθνικών και διεθνών θεμάτων, και μέσω αυτής, τη δυνατότητα να επηρεαστεί η πολιτική τους.
4. Οι πολίτες μπορούν, εφόσον το επιθυμούν, να συμμετέχουν σε πολλαπλά στάδια της επιστημονικής διαδικασίας. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ερευνητικών ερωτήσεων, το σχεδιασμό της μεθόδου, τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων και την κοινοποίηση των αποτελεσμάτων.
5. Οι πολίτες λαμβάνουν ανατροφοδότηση από το πρόγραμμα. Για παράδειγμα, πώς χρησιμοποιούνται τα δεδομένα τους και ποια είναι τα αποτελέσματα σε επίπεδο ερευνητικό, πολιτικό και κοινωνικό.
6. Η Επιστήμη του Πολίτη θεωρείται μια ερευνητική προσέγγιση όπως κάθε άλλη, με περιορισμούς και προκαταλήψεις, οι οποίες πρέπει να εξεταστούν και να ελεγχθούν. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές ερευνητικές προσεγγίσεις, η Επιστήμη του Πολίτη παρέχει την ευκαιρία για μεγαλύτερη συμμετοχή του κοινού και εκδημοκρατισμό της επιστήμης.
7. Τα δεδομένα και μετα-δεδομένα στα προγράμματα της Επιστήμης του Πολίτη δημοσιοποιούνται και όπου είναι δυνατόν, τα αποτελέσματα δημοσιεύονται σε μορφή ανοιχτής πρόσβασης. Η δημοσίευση δεδομένων μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια ή στο τέλος του προγράμματος, εκτός αν υπάρχουν θέματα ασφάλειας ή ιδιωτικότητας που την εμποδίζουν.
8. Οι πολίτες και η συνεισφορά τους αναγνωρίζονται στα αποτελέσματα του προγράμματος και σε δημοσιεύσεις.
9. Τα προγράμματα της Επιστήμης του Πολίτη αξιολογούνται για τα επιστημονικά τους αποτελέσματα, την ποιότητα των δεδομένων, την εμπειρία των συμμετεχόντων και τον ευρύτερο κοινωνικό ή πολιτικό αντίκτυπο.
10. Οι επικεφαλής των προγραμμάτων Επιστήμης του Πολίτη λαμβάνουν υπόψη νομικά ζητήματα και ζητήματα ηθικής δεοντολογίας σε σχέση με τη συγγραφική ιδιοκτησία, την πνευματική ιδιοκτησία, τις συμφωνίες κοινής χρήσης δεδομένων, το απόρρητο, την αναφορά προέλευσης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις οποιασδήποτε δραστηριότητας.

Διαπιστώνεται ότι η εμπλοκή των πολιτών στην επιστήμη έχει οφέλη και για τις δύο πλευρές τόσο των πολιτών όσο και της επιστημονικής κοινότητας αφού δίνεται η ευκαιρία για μάθηση,

<sup>1</sup> ECSA (European Citizen Science Association). 2015. Ten Principles of Citizen Science. Berlin. <http://doi.org/10.17605/OSF.IO/XPR2N> μτφρ

ικανοποιείται το αίσθημα της προσφοράς και συνεισφοράς σε μια κοινότητα και την επίλυση προβλημάτων τοπικών αλλά και εθνικών ή διεθνών. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια επιστημονική μεθοδολογία με τους περιορισμούς της. Όμως διαφοροποιείται από το γεγονός ότι δημιουργεί προϋποθέσεις για συμμετοχή του κοινού η οποία οδηγεί στον εκδημοκρατισμό της γνώσης και την αναγνώριση της συνεισφοράς των πολιτών στα αποτελέσματα των προγραμμάτων.

Καθιερώνεται τελευταία στην επιστημονική πρακτική (Jørgensen and Jørgensen, 2021). Κυρίως σε θέματα συλλογής και δημόσιας παρακολούθησης δεδομένων από εκπαιδευμένους μη ειδικούς πολίτες, με στόχο την αντιμετώπιση διαφόρων περιβαλλοντικών προβλημάτων με στόχο να συμβάλουν στη προστασία της φύσης (Vasiliades et al., 2021).

## 4.2 Επίπεδα συμμετοχής

Πίνακας 10 Επίπεδα συμμετοχής στην Επιστήμη των Πολιτών (Απόδοση από Haklay)

Επίπεδο 4 «Έντονη συμμετοχή στην επιστήμη των πολιτών»	Συνεργατική επιστήμη – ορισμός προβλήματος, συλλογή δεδομένων και ανάλυση
Επίπεδο 3 «Συμμετοχική επιστήμη»	Συμμετοχή στον προσδιορισμό του προβλήματος και τη συλλογή δεδομένων
Επίπεδο 2 «Διαμοιρασμός πληροφορίας»	Οι πολίτες ως βασικοί διερμηνείς Εθελοντική σκέψη
Επίπεδο 1 «Πληθοπορισμός»	Οι πολίτες ως αισθητήρες Εθελοντική πληροφορία

## 4.3 Προκλήσεις

Η επιστήμη των πολιτών, καθιερώνεται τελευταία στην επιστημονική πρακτική (Jørgensen and Jørgensen, 2021). Κυρίως σε θέματα συλλογής και δημόσιας παρακολούθησης δεδομένων από εκπαιδευμένους μη ειδικούς πολίτες, με στόχο την αντιμετώπιση διαφόρων περιβαλλοντικών προβλημάτων με στόχο να συμβάλουν στη προστασία της φύσης (Vasiliades et al., 2021).

Οι (Fritz, See and Grey, 2022) θέτουν κάποιες προκλήσεις στην επιστήμη των πολιτών και κυρίως στην εμπλοκή με το περιβάλλον και τις δράσεις για την κλιματική αλλαγή που η ευαισθητοποίηση των πολιτών συνεχώς αυξάνεται. Πρωτίστως, η ποιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων η οποία αντιμετωπίζεται με το πλήθος συλλογής δεδομένων αλλά και τη διασταύρωση των στοιχείων που έχουν ληφθεί από πολίτες με αυτά που δίνονται από τους επιστήμονες. Κρίσιμο ζήτημα επίσης αποτελούν τα ανοιχτά δεδομένα, ο διαμοιρασμός τους και η ασφαλής χρήση τους μόνο για ερευνητικούς σκοπούς και η προστασία των προσωπικών δεδομένων καθώς και η χρήση των αποτελεσμάτων από κυβερνητικές ή τοπικές αρχές.

Διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής της επιστήμης των πολιτών στα περιβαλλοντικά ζητήματα, φαίνεται ότι μπορεί να αποτελέσει επιταχυντή στην επίτευξη πολλών Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) των Ηνωμένων Εθνών αλλά και να έχει θετικό αντίκτυπο στην παρακολούθηση της πρόοδο προς την εφαρμογή τους (Skondras et al., 2022). Καθώς οι ΣΒΑ θέτουν ένα πλαίσιο για την επιτυχή και ισόρροπη ανάπτυξης κοινωνίας, οικονομίας και περιβάλλοντος, απαιτείται και η συμβολή των πολιτών για την επιτυχή ολοκλήρωση μέχρι το 2030 σε όλες τις κλίμακες.

Είναι γεγονός ότι οι ψηφιακές τεχνολογίες και λύσεις καλλιεργούν έδαφος και δίνουν ευκαιρίες εύκολης συμμετοχής των πολιτών. Αυτό είναι εφικτό καθώς έχει ενισχυθεί η εμπλοκή των πολιτών καθώς οι ψηφιακές εφαρμογές και τεχνολογίες εύνουν τη συμμετοχή πχ smartphones, GPS (Rossiter et al., 2015). Από την άλλη πλευρά όμως καταγράφεται και ενίσχυση ανισοτήτων εξαιτίας του ψηφιακού χάσματος ιδίως σε αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτό όπως και η παρότρυνση των πολιτών για

συμμετοχή, μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω αντικινήτρων για εμπλοκή σε δράσης επιστήμης των πολιτών.

#### **4.4 Παραδείγματα εφαρμογής πρακτικών Επιστήμης των Πολιτών στην μελέτη του εδάφους ή την κυκλική οικονομία**

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά ορισμένες περιπτώσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία που βασίζονται στη μεθοδολογία της επιστήμης των πολιτών για την καταγραφή δεδομένων και ενεργό συμμετοχή των πολιτών και εστιάζουν στην μελέτη του εδάφους ή την κυκλική οικονομία.

##### **4.4.1 Ψηφιακή χαρτογράφηση εδάφους με συμμετοχή διαφορετικών ομάδων**

Η συμβολή των πολιτών στην παρατήρηση στοιχείων εδάφους και τοπίου σε μια δράση που καλείται DSM (digital soil mapping). Μέσα από αυτή, επιτυγχάνεται η συμμετοχή σε επιστημονική διαδικασία και η περαιτέρω σύνδεση με το τοπίο αλλά και η αύξηση της ποσότητας των δεδομένων και η μεγαλύτερη γεωγραφική κατανομή (Rossiter *et al.*, 2015).

Σκοπός είναι η βελτίωση των εδαφολογικών χαρτών οι οποίοι θεωρούνται ανοιχτοί και δημόσιοι προς χρήση από τους πολίτες. Στους εμπλεκόμενους στη διαδικασία αυτή η εφαρμογή DSM εμπλέκει διαφορετικές ομάδες συμμετεχόντων που θα μπορούσαν να συνεισφέρουν με χρήσιμες πληροφορίες αλλά και να την αξιοποιήσουν μετά την επεξεργασία της όπως:

- Γεωπόνοι που θα χρησιμοποιήσουν τα δεδομένα στην επαγγελματική τους δραστηριότητα
- Γεωργοί που είναι ήδη εξοικειωμένοι με το τοπίο και γνωρίζουν την αξία των πληροφοριών για το έδαφος οι οποίοι θα έχουν καλύτερο εδαφολογικό χάρτη της περιοχής που διαχειρίζονται
- Μηχανικοί και άλλοι εμπλεκόμενοι στην κατασκευαστική διαδικασία
- Εκπαιδευτικοί που διδάσκουν σχετικά μαθήματα όπως γεωγραφία
- Κηπουροί οι οποίοι ασχολούνται με μικρές εκτάσεις
- Πεζοπόροι και περιπατητές
- Κυνηγοί
- Οικολόγοι «πράσινοι»

Οι (Rossiter *et al.*, 2015) θέτουν ένα βασικό ζήτημα κατά την επεξεργασία, αυτό της ενσωμάτωσης των παρατηρήσεων και της αξιολόγησης της ποιότητας και της αξιοπιστίας των δεδομένων που συλλέγονται από μη ειδικούς. Πιο συγκεκριμένα από τους πολίτες τα πρωτογενή δεδομένα συνήθως είναι οι παρατηρήσεις στο πεδίο με φωτογραφίες, σκίτσα και περιγραφές. Οι παρατηρήσεις από τους ερευνητές μετρήσεις πεδίου (π.χ. pH εδάφους, χαρακτηριστικά επιφάνειας), υπέδαφος (τομές, προφίλ), εργαστηριακές μετρήσεις ή δεδομένα αισθητήρων. Πρέπει επομένως να αξιολογηθεί η ποιότητα των παρατηρήσεων από τους πολίτες και να συνδυαστούν τα δεδομένα που είναι λιγότερο ακριβή με τα επιστημονικά. Ο έλεγχος μπορεί να γίνει με βάση κάποιο μοντέλο ή να διαπιστωθεί αν ανήκει σε κάποιο διάστημα εμπιστοσύνης.

Ως προκλήσεις στο σχεδιασμό της εφαρμογής DSM και το έργο της επιστήμης των πολιτών οι συγγραφείς θέτουν τη σαφή περιγραφή για το ποιες πρόσθετες πληροφορίες για το DSM μπορούν εύκολα και με ασφάλεια να συλλεχθούν από κάποιον μη ειδικευμένο. Δεύτερον τον προσδιορισμό ομάδων πολιτών με μια ισχυρή επικοινωνιακή εκστρατεία με κατάλληλα μέσα και ίσως ευκαιρίες κατάρτισης. Επίσης τα πρωτόκολλα συλλογής και υποβολής δεδομένων από τους πολίτες.







Τα οφέλη της επιστήμης των πολιτών που σχετίζονται με το DSM ενδέχεται να υπερβαίνουν τον άμεσο στόχο της βελτίωσης των εδαφικών χαρτών και να επεκταθούν μακροπρόθεσμα στην ενίσχυση της συνείδησης για μελέτη, διάγνωση, προστασία, συντήρηση και βελτίωση των κρίσιμων φυσικών πόρων όπως το έδαφος.

#### 4.4.2 Αξιολόγηση των απαιτήσεων ετήσιων πόρων για τη λειτουργία αστικών λαχανόκηπων στο Ηνωμένο Βασίλειο: μια προσέγγιση με την επιστήμη των πολιτών

Η συνεχιζόμενη αύξηση του αστικού πληθυσμού παγκοσμίως δημιουργεί προσκλήσεις στη βιωσιμότητα των πόλεων. Μια από τις προκλήσεις, είναι η εξάρτηση των πόλεων από τις διεθνείς εφοδιαστικές αλυσίδες τροφίμων. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, σε αρκετές πόλεις επιχειρείται η υιοθέτηση των βραχείων αλυσίδων εφοδιασμού και εκεί συναντάται και η εφαρμογή των αστικών λαχανόκηπων (Yacamán and Ebel, no date).

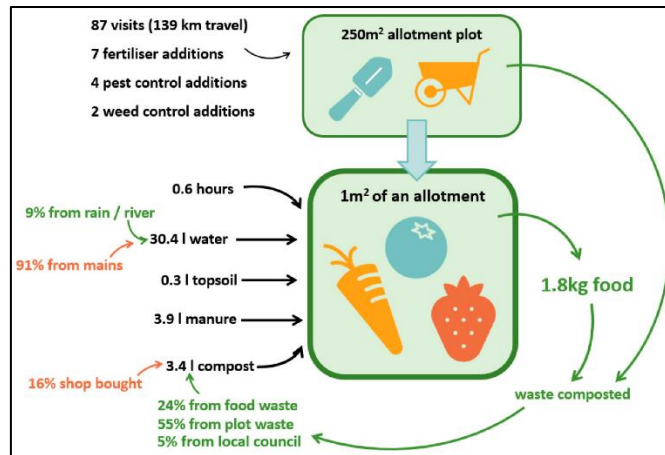
Οι (Dobson, Warren and Edmondson, 2021) μελετούν την καταγραφή των απαιτούμενων ετήσιων πόρων σε αγροτεμάχια τα οποία είχαν εκχωρηθεί σε πολίτες για την κάλυψη των αναγκών σε τρόφιμα στο Ηνωμένο Βασίλειο. Σημειώνεται ότι στη διάρκεια της πανδημίας COVID-19 η ζήτηση αυτών των εκτάσεων αυξήθηκε (Khan *et al.*, 2020).

Μεθοδολογικά η κινητοποίηση των πολιτών για εθελοντική συμμετοχή έγινε μέσω επικοινωνίας και διάχυσης σε σχετικές ιστοσελίδες και μέσα κοινωνικής δικτύωσης και συγκεκριμένα μέσω της ιστοσελίδας <https://myharvest.org.uk/>. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν σε κάθε επίσκεψη στο αγροτεμάχιο τους να συμπληρώσουν ένα συγκεκριμένο έντυπο με τη δραστηριότητά τους. Αυτό συμπεριελάμβανε την ημερομηνία επίσκεψης, τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν, το μεταφορικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε, την ποσοτικοποίηση της χρήσης νερού από το δίκτυο ή από δοχεία νερού βροχής. Επίσης οποιαδήποτε χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων ή ζιζανιοκτόνων κομπόστ, και προσθήκες φυτικού εδάφους (σε αριθμό οχημάτων ή σάκων που χρησιμοποιούνται), στοιχεία για τη σπορά ή τη συγκομιδή και όποιες άλλες σημειώσεις θεώρησαν ότι ήθελαν να μοιραστούν.

<b>Date:</b>	
<b>Weather:</b>      	
<b>Hours spent on plot:</b> <input type="checkbox"/> less than 1 <input type="checkbox"/> 1–2 <input type="checkbox"/> 2–4 <input type="checkbox"/> 4–6 <input type="checkbox"/> more than 6	
<b>Transport to plot:</b> <input type="checkbox"/> car <input type="checkbox"/> public transport <input type="checkbox"/> bicycle <input type="checkbox"/> foot <input type="checkbox"/> other	
<b>Inputs:</b> Water from	<input type="checkbox"/> mains using _____ minutes <input type="checkbox"/> water butt _____ watering cans
Compost from	<input type="checkbox"/> home waste using _____ wheelbarrows <input type="checkbox"/> plot waste _____ sacks <input type="checkbox"/> purchased
Manure	_____ wheelbarrows _____ sacks
Topsoil	_____ wheelbarrows _____ sacks
Pest/weed control	_____
Fertiliser	_____
<b>Any power tools used:</b> <input type="checkbox"/> battery operated: <input type="checkbox"/> petrol operated:	
<b>Planting and harvesting</b>	
<b>Other activities (e.g., weeding)</b>	
<b>Wildlife observed</b>	
<b>Notes</b>	

Σχήμα 6 Έντυπο καταγραφής, πηγή: Dobson, Warren and Edmondson, 2021

Σε διάρκεια ενός έτους 163 πολίτες παρέδωσαν πλήρη στοιχεία με τα «ημερολόγια» τους. Στη συνέχεια τα στοιχεία επεξεργάστηκαν στατιστικά και υπολογίστηκαν οι συνολικές απαιτήσεις πόρων.



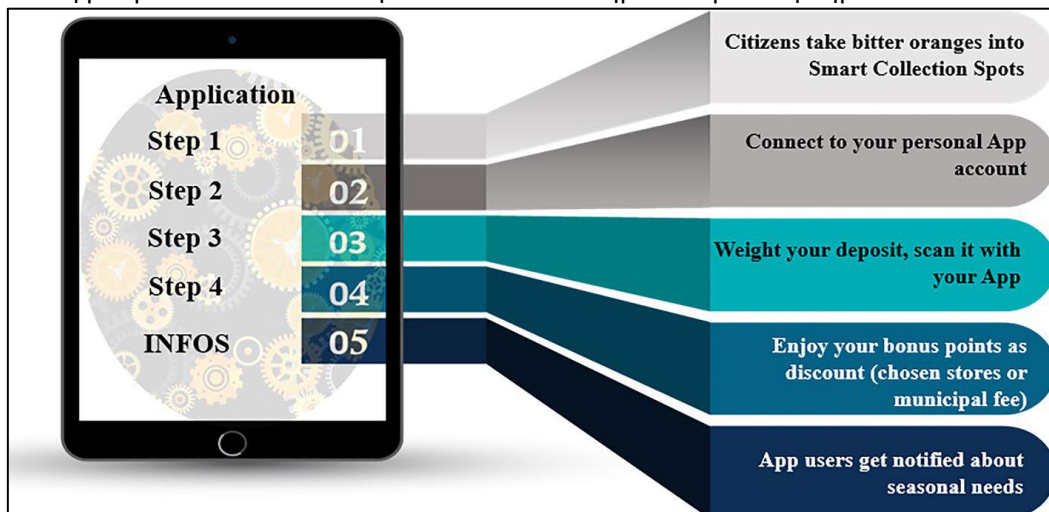
Σχήμα 7, Ετήσιες ανάγκες πόρων. Πηγή: (Dobson, Warren and Edmondson, 2021)

Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, χαρτογράφηση, διαδρομές και προτάσεις για μείωση χρήσης νερού, ελάττωση της σπατάλης τροφίμων ή αλλαγή στη χωροθέτηση δραστηριοτήτων με σκοπό την εξοικονόμηση τους κόστους μεταφοράς (Dobson, Warren and Edmondson, 2021).

#### 4.4.3 Συμμετοχή και επιβράβευση πολιτών στη διαχείριση βιομάζας. Η περίπτωση της Αθήνας

Μια εφαρμογή για τις νεραντζιές της Αθήνας, συνδυάζει τις λειτουργίες IoT και ευαισθητοποιεί τους πολίτες σε θέματα βιοοικονομίας. Το δέντρο το οποίο αναπτύσσεται σε μεγάλη έκταση της πόλης, έχει αισθητική αξία αλλά ο καρπός του δεν είναι βρώσιμος. Έτσι δεν υπάρχει κάποιο όφελος από τη συγκομιδή του με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλη ποσότητα βιομάζας και να υπολογίζεται ότι 40.000 τόνοι ετησίως παραμένουν ανεκμετάλλευτοι.

Με τη χρήση της εφαρμογής “free Bitter Orange” ο πολίτης συμμετέχει στη συλλογή φρούτων και γνωρίζει τα σημεία διαλογής όπως κατανέμονται στην πόλη. Στη συνέχεια ακολουθεί η σύνδεση με την εφαρμογή, το ζύγισμα φορτίου και η επιστροφή επιβράβευσης. (Neofotistos *et al.*, 2023). Η ανταπόδοση μπορεί να είναι έκπτωση σε κάποιο κατάστημα είτε μείωση δημοτικών τελών.



Σχήμα 8 Η εφαρμογή “free Bitter Orange” Πηγή: (Neofotistos *et al.*, 2023)

Αυτό μπορεί να γενικευθεί σε οποιαδήποτε πλατφόρμα για τη διαχείριση των αστικών απορριμμάτων καθώς και στην παρακίνηση μέσω της επιστήμης των πολιτών ανεξάρτητα από το είδος της βιομάζας. Στόχος είναι όλοι οι πιθανοί φορείς της τοπικής κοινωνίας να πολλαπλασιάσουν την ευαισθητοποίηση σε περιβαλλοντικά ζητήματα και να δεσμευτούν για τη σωστή διαχείριση αποβλήτων.



#### 4.4.4 GROW

Το Παρατηρητήριο GROW<sup>2</sup> προέκυψε ως εφαρμογή στην υλοποίηση χρηματοδοτούμενου προγράμματος Η2020. Είναι ένα παρατηρητήριο εδάφους που βασίζεται στην επιστήμη των πολιτών σ ευρωπαϊκό επίπεδο και συμπεριλαμβάνει 24 κοινότητες GROW σε 13 ευρωπαϊκές χώρες.

Το (GROW) αποτελεί μια πλατφόρμα αλλά και κοινότητα πολιτών για τη δημιουργία, την ανταλλαγή και τη χρήση πληροφοριών σχετικά με τη γη, το έδαφος και τους υδάτινους πόρους. Στόχος είναι η διαφύλαξη του εδάφους μέσω τεχνολογιών, ικανοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις της παραγωγής τροφίμων χρησιμοποιώντας την επιστήμη του διαστήματος αλλά και την τοπική γνώση και συμβολή.

Το GROW είναι εξαιρετικά καινοτόμο έργο που αξιοποιεί και συνδυάζει χαμηλού κόστους τεχνολογία ανίχνευσης μέσω του καταναλωτή, με μια απλή δοκιμή εδάφους και μια μεγάλη βάση χρηστών από καλλιεργητές για να συνεισφέρουν με δεδομένα εδάφους και γης. Έχει σχεδιαστεί για να προσελκύει κυρίως καλλιεργητές και αγρότες μικρής κλίμακας σε όλη την Ευρώπη και να τους δίνει τη δυνατότητα να αναπτύξουν καινοτόμες πρακτικές μέσω της συλλογικής δράσης των κοινών και ανοιχτών δεδομένων.

Οι πολίτες που συνεισφέρουν δεδομένα θα αποκτήσουν πρόσβαση στην πρώτη ολοκληρωμένη υπηρεσία παροχής συμβουλών για καλλιέργεια και άρδευση και θα εκπαιδευθούν γύρω από τις τοπικές ανάγκες και ζητήματα, για να υποστηρίξουν την εξυπνότερη λήψη αποφάσεων και την εφαρμογή των στόχων στις καλλιέργειές τους.

Η εφαρμογή GROW χρησιμοποιεί παρατηρήσεις εδάφους από πλήθος δεδομένων που λαμβάνονται από αισθητήρες χαμηλού κόστους για να επικυρώσει πληροφορίες σχετικά με την υγρασία του εδάφους από δορυφόρους, συμπεριλαμβανομένης της νέας γενιάς δορυφόρων υψηλής ανάλυσης, Sentinel-1. Φαίνεται ότι ο συνδυασμός επιστήμης των πολιτών και εφαρμογής της τοπικής γνώσης μπορεί να δρα υποστηρικτικά σε μεγάλα ερευνητικά έργα.

#### 4.4.5 Κόμβος Επιστήμης των Πολιτών ΑΠΘ

Στις 15/06/2022, ιδρύθηκε ο Κόμβος Επιστήμης των Πολιτών (Κόμβος ΕτΠ) ΑΠΘ με σκοπό να προωθήσει, ενημερώσει, και να ενθαρρύνει την συμμετοχή των πολιτών στην επιστημονική και ερευνητική δραστηριότητα. Ο Κόμβος ΕτΠ ΑΠΘ διοργανώνει δραστηριότητες μαζί και για τους πολίτες, με απώτερο σκοπό να έρθουν κοντά στην έρευνα και την επιστήμη και να συμβάλλουν στην επίλυση καίριων προβλημάτων της εποχής μας.

Ο Κόμβος ΕτΠ του ΑΠΘ ιδρύθηκε για να φέρει κοντά την κοινωνία με την επιστήμη και να ενθαρρύνει όλους τους πολίτες να συμμετέχουν στην συν-δημιουργία και συν-παραγωγή νέας γνώσης. Στα έργα του περιλαμβάνονται δράσεις για διενέργεια πρωτογενούς έρευνας στον τομέα της ΕτΠ, εκπαιδευτικών και επιμορφωτικών προγραμμάτων και συμμετοχή σε έργα εθνικού, κοινοτικού & διεθνούς ενδιαφέροντος<sup>3</sup>.

Ζητούμενο όλων των δράσεων επιστήμης των πολιτών, αποτελεί η εξοικείωση και η συμμετοχή των πολιτών με την επιστημονική μεθοδολογία. Ο ρόλος του ερευνητή είναι να δρα ως ενδιάμεσος και συνδετικός κρίκος ώστε αφενός να εκλαϊκεύσει την επιστημονική ορολογία αφετέρου να προσλάβει πληροφορία από το ευρύ κοινό και να τη μετουσιώσει σε επιστημονική γνώση αλλά και να την αποδώσει στο ευρύ κοινό ως πληροφορία.

Μία από τις πρόσφατες δράσεις που υλοποιήθηκε από τον Κόμβος ΕτΠ του ΑΠΘ αφορούσε τη συμμετοχή των πολιτών στην ερμηνεία δεικτών, συμπεριλαμβανομένου του δείκτη βλάστησης. Στη δράση «Μεταφράζοντας την επιστήμη πίσω από τους δείκτες» οι συμμετέχοντες/ουσες κλήθηκαν να ερμηνεύσουν μέσω χαρτών, τρεις βασικούς περιβαλλοντικούς δείκτες που επηρεάζουν την υγεία στις πόλεις μας: την ατμοσφαιρική ρύπανση, την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία και τον δείκτη

<sup>2</sup> <https://growobservatory.org/>

<sup>3</sup> <https://cshub.auth.gr/>



βλάβησης. Συγκεκριμένα, οι ίδιοι χάρτες ήταν διαθέσιμοι σε δύο μορφές: μια με επιστημονικό υπόμνημα και μια με πιο εκλαϊκευμένο. Οι συμμετέχοντες/ουσες αφού τους παρατήρησαν προσεκτικά κατέγραψαν σε ερωτηματολόγια το βαθμό κατά τον οποίο αντιλαμβάνονται ότι οι δείκτες αυτοί επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Βασική πτυχή της εκδήλωσης ήταν το στοιχείο της συμμετοχικότητας, καθώς οι συμμετέχοντες ενεπλάκησαν ενεργά με το θέμα. Οι διοργανωτές προέτρεψαν τους συμμετέχοντες να μοιραστούν τις απόψεις και τις σκέψεις τους σχετικά με πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την αναπαράσταση και χαρτογράφηση επιστημονικών δεδομένων και δεικτών. Αυτή η ανταλλαγή ιδεών όχι μόνο προώθησε ένα συνεργατικό περιβάλλον μάθησης, αλλά λειτούργησε επίσης ως πολύτιμη βάση για συλλογική ανάπτυξη και ενίσχυση της γνώσης.



Εικόνα 1 Δράση κόμβου ΕτΠ ΑΠΘ

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξένη Βιβλιογραφία

- Abawi G.S., Widmer T.L. (2000). Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. *Appl. Soil. Ecol.* 15(1), 37-47. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00070-6)
- Aemig, Q. et al. (2019) 'Organic micropollutants' distribution within sludge organic matter fractions explains their dynamic during sewage sludge anaerobic digestion followed by composting', *Environmental Science and Pollution Research*, 26(6), pp. 5820–5830. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-4014-7>
- Agrios G.N. (2017). Φυτοπαθολογία. Εκδόσεις Utopia, Αθήνα, ISBN: 978-618-81298-8-7
- Alvarenga, P. et al. (2015) 'Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors', *Waste Management*, 40, pp. 44–52. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.027>.
- Al-Thawadi SM. 2011. Ureolytic bacteria and calcium carbonate formation as a mechanism of strength enhancement of sand, *J. Advanced Science and Engineering Research* 1: 98-114
- Anbu P, Kang C-H, Shin Y-J, So J-S. 2016. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications, *SpringerPlus* 5: 250. DOI: [10.1186/s40064-016-1869-2](https://doi.org/10.1186/s40064-016-1869-2)
- Arnstein, S.R. (1969) 'A Ladder Of Citizen Participation', *Journal of the American Planning Association*, 35(4), pp. 216–224. Available at: <https://doi.org/10.1080/01944366908977225>.
- Bakker P.A.H.M., Berendsen R.L., Doornbos R.F., Wintermans P.C.A., Pieterse C.M.J. (2013). The rhizosphere revisited: Root microbiomics. *Front. Plant Sci.* 4(165), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00165>
- Barth, J. (2010) 'EU Working Document: Sludge and Biowaste. Brussels 2010'.
- Bernandi D, DeJong JT, Montoya BM, Martinez BC. 2014. Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks, *Construction and Building Materials* 55: 462-469. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.019>
- Botusharova S, Gardner D, Harbottle M. 2020. Augmenting Microbially Induced Carbonate Precipitation of Soil with the Capability to Self-Heal, *J. Geot. Geoenv. Eng.* 146(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002214)
- Brisolara, K.F. and Qi, Y. (2015) 'Biosolids and Sludge Management', *Water Environment Research*, 87(10), pp. 1147–1166. Available at: <https://doi.org/10.2175/106143015X14338845155507>.
- Brown S., Ippolito J.A., Hundal L.S., Basta N.T. (2020). Municipal biosolids – A resource for sustainable communities. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 14, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.02.007>
- Burbank MB, Weaver TJ, Green TL, Williams BC, Crawford RL. 2011. Precipitation of Calcite by Indigenous Microorganisms to Strengthen Liquefiable Soils, *Geomicrobiology J.* 28(4): 301-312. <http://dx.doi.org/10.1080/01490451.2010.499929>
- Cai, Q.-Y. et al. (2007) 'Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts', *Journal of Hazardous Materials*, 147(3), pp. 1063–1072. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.142>.
- Cheng L. 2012. Innovative Ground Enhancement by Improved Microbially Induced CaCO<sub>3</sub> Precipitation Technology, PhD Dissertation, Murdoch University, Perth, Western Australia
- Cheng L, Cord-Ruwisch R, Shahin M. 2013. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Can. Geot. J.* 50: 81-90. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0023>
- Cheng L, Cord-Ruwisch R. 2014. Upscaling Effects of Soil Improvement by Microbially Induced Calcite Precipitation by Surface Percolation, *Geomicrobiology J.* 31(5), 396-406. [10.1080/01490451.2013.836579](https://doi.org/10.1080/01490451.2013.836579)

Cheng L, Shahin MA, Mujah D. 2016. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* ASCE **143**(1): 04016083. DOI: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001586](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001586)

Chittoori B, Pathak A, Burbank M, Islam T. 2020. Application of Bio-Stimulated Calcite Precipitation to Stabilize Expansive Soils: Field Trials, *Proc. Geo-Congress 2020: Biogeotechnics*. [10.1061/9780784482834.013](https://doi.org/10.1061/9780784482834.013)

Christou, A. et al. (2019) 'Ranking of crop plants according to their potential to uptake and accumulate contaminants of emerging concern', *Environmental Research*, 170, pp. 422–432. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.048>.

Chu J, Ivanov V, He J, Maeimi M, Wu S. 2015. Use of Biogeotechnologies for Soil Improvement, Chapter 19 in *Ground Improvement Case Histories Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering*: 571-589. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100191-2.00019-8>

Collivignarelli, M.C., Canato, M., et al. (2019) 'Biosolids: What are the different types of reuse?', *Journal of Cleaner Production*, 238, p. 117844. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117844>.

Collivignarelli, M.C., Abbà, A., et al. (2019) 'Legislation for the Reuse of Biosolids on Agricultural Land in Europe: Overview', *Sustainability*, 11(21), p. 6015. Available at: <https://doi.org/10.3390/su11216015>.

Congreves K.A. (2022) Urban horticulture for sustainable food systems. *Front. Sustain. Food Syst.* 6:974146. doi: [10.3389/fsufs.2022.974146](https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.974146)

Cotxarrera. L, Trillas-Gay M.I., Steinberg C., Alabouvette C. (2002). Use of sewage sludge compost and *Trichoderma asperellum* isolates to suppress *Fusarium* wilt of tomato. *Soil Biol. Biochem.* 34(4), 467–476. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00205-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00205-X)

DeJong T, Fritzges B, Nüsslein K. 2006. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shearing, *J. Geot. Geoenv. Eng.* ASCE **132**(11): 1381-1392. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:11\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1381))

DeJong JT, Soga K, Banwart SA, Whalley WR, Ginn TR, Nelson DC, Mortensen BM, Martinez BC, Barkouki T. 2011. Soil engineering in vivo: harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering solutions, *J. R. Soc. Interface* **8**(54): 1-15. <https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0270>

DeJong J, Soga K, Kavazanjian E. 2013. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities, and challenges, *Géotechnique* **63**(4): 287-301. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.017>

DeMuynck W, DeBelie N, Verstraete W. 2010. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review, *Ecol. Eng.* **36**(2): 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>

Dhami NK, Reddy MS, Mukherjee A. 2014. Synergistic role of bacterial urease and carbonic anhydrase in carbonate mineralization, *Appl. Biochem. Biotechnol.* **172**: 2552-2561. DOI: [10.1007/s12010-013-0694-0](https://doi.org/10.1007/s12010-013-0694-0)

Dhami NK, Alsubhi WR, Watkin E, Mukherjee A. 2017. Bacterial Community Dynamics and Biocement Formation during Stimulation and Augmentation: Implications for Soil Consolidation, *Frontiers in Microbiology* **8**: 1267. DOI: [10.3389/fmicb.2017.01267](https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01267)

Ding J, Wang Z, Zhang N, Jiang P, Peng M, Jin Y, Li Q. 2019. Experimental study on thermal conductivity of sand solidified by microbially induced calcium carbonate precipitation, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **304**: 052069. DOI: [10.1088/1755-1315/304/5/052069](https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052069)

Do J, Montoya B, Gabr M. 2019. Debonding of microbially induced carbonate precipitation stabilized sand by shearing and erosion, *Geomechanics and Engineering* **17**(5): 429-438. DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.429>

Dobson, M.C., Warren, P.H. and Edmondson, J.L. (2021) 'Assessing the direct resource requirements of urban horticulture in the United Kingdom: A citizen science approach', *Sustainability* (Switzerland), 13(5), pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13052628>.

Dohányos, M. et al. (2004) 'Improvement of anaerobic digestion of sludge', *Water Science and Technology*, 49(10), pp. 89–96. Available at: <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0616>

Dosier. 2015. *Patent No. US 8,951,786 B1*, Dosier, US.

Dubey AA, Ravi K, Mukherjee A, Sahoo L, Abiala MA, Dharmi NK. 2021. *Biocementation mediated by native microbes from Brahmaputra riverbank for mitigation of soil erodibility*, *Sci Rep* **11**, 15250. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94614-6>

Duraisamy Y. 2016. *Strength and stiffness improvement of bio-cemented Sydney sand*, PhD thesis, University of Sydney, Sydney, Australia

Duraisamy Y, Airey D. 2019. Geomechanical Behavior of Bio-Cemented Sand for Foundation Works, Chapter in *Sandy Materials in Civil Engineering - Usage and Management*. Ed. S. Nemati, F. Tahmoorian. DOI: [10.5772/intechopen.88159](https://doi.org/10.5772/intechopen.88159).

Estiu G, Merz KM. 2004. The hydrolysis of urea and the proficiency of urease, *J. Am. Chem. Soc.* **126**(22): 6932-6944. <https://doi.org/10.1021/ja049327g>

European Parliament and of the Council (2018) DIRECTIVE (EU) 2018/851 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj> (Accessed: 31 August 2023).

Ferris FG, Stehmeier LG, Kantzas A, Mourits FM. 1996. Bacteriogenic mineral plugging, *J Canadian Petroleum Technology* **35**(8): 56-61

Ferris FG, Phoenix V, Fujita Y, Smith RW. 2004. Kinetics of Calcite Precipitation Induced by Ureolytic Bacteria at 10 to 20°C in Artificial Groundwater, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **68**(8): 1701–1710. doi: [10.1016/S0016-7037\(00\)00503-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00503-9)

Fritz, S., See, L. and Grey, F. (2022) ‘The grand challenges facing environmental citizen science’, *Frontiers in Environmental Science*. Frontiers Media S.A. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1019628>.

Fuentes, D., Smanis, A. and Valdecantos, A. (2017) ‘Recreating Sink Areas on Semiarid Degraded Slopes by Restoration’, *Land Degradation & Development*, **28**(3), pp. 1005–1015. Available at: <https://doi.org/10.1002/ldr.2671>.

Gallagher P. 2000. *Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk*, PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA.

Giannakis I., Manitsas C., Eleftherohorinos I., Menexes G., Emmanouil C., Kungolos A., Lagopodi A.L. (2021). Use of biosolids to enhance tomato growth and tolerance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. *Environ. Process.* **8**, 1415-1431. <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00538-8>

Gomez MG, Martinez BC, DeJong JT, Hunt CE, deVlaming LA, Major DW, Dworatzek SM. 2015. Field-scale bio-cementation tests to improve sands, *Ground Improvement* ICE: 1300052. <http://dx.doi.org/10.1680/grim.13.00052>

Gomez MG, Anderson CM, Graddy CMR, DeJong JT, Nelson DC, Ginn TR. 2016. Large-Scale Comparison of Bioaugmentation and Biostimulation Approaches for Biocementation of Sands, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **143**(5): 04016124. DOI: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001640](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001640)

Gomez MG, DeJong JT. 2017. Engineering properties of bio-cementation improved sandy soils, *Grouting ASCE GSP* **288**: 23-33. <https://doi.org/10.1061/9780784480793.003>

Gomez MG, Graddy CMR, DeJong JT, Nelson DC. 2019. Biogeochemical Changes During Bio-cementation Mediated by Stimulated and Augmented Ureolytic Microorganisms, *Nature Search Scientific Reports* **9**: 11517. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47973-0>

Hamdan N, Kavazanjian E, O'Donnell S. 2013. Carbonate cementation via plant derived urease, *Proc. 18<sup>th</sup> IC Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics*, ICSMGE **3**: 2489-2492

Hammes F, Boon N, de Villiers J, Verstraete W, Siciliano S. 2003 Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation, *Applied and Environmental Microbiology* **69**(8): 4901-4909. DOI: [10.1128/AEM.69.8.4901-4909.2003](https://doi.org/10.1128/AEM.69.8.4901-4909.2003)

Han Z, Cheng X, Ma Q. 2016. An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands, *Earth. Eng. & Eng. Vibr.* **15**(4): 673-679. <https://doi.org/10.1007/s11803-016-0357-6>

Hargreaves, J.C., Adl, M.S. and Warman, P.R. (2008) ‘A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture’, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **123**(1), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.004>.



Hausinger RP. 1993. Urease, Chapter in *Biochemistry of Nickel*. Biochemistry of the Elements 12. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9435-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9435-9_3)

He M., Jahan M.S., Wang Y., Sun J., Shu S., Guo S. (2020). Compost Amendments Based on Vinegar Residue Promote Tomato Growth and Suppress Bacterial Wilt Caused by *Ralstonia Solanacearum*. *Pathogens* 9(3), 227. <https://doi.org/10.3390/pathogens9030227>

Holling, C.S. et al. (2012) 'Uptake of human pharmaceuticals and personal care products by cabbage (*Brassica campestris*) from fortified and biosolids-amended soils', *Journal of Environmental Monitoring*, 14(11), pp. 3029–3036. Available at: <https://doi.org/10.1039/C2EM30456B>.

Imran MA, Kimura S, Nakashima K, Evelpidou N, Kawasaki S. 2019. Feasibility Study of Native Ureolytic Bacteria for Biocementation Towards Coastal Erosion Protection by MICP Method, *Appl. Sci.* **9**: 4462. DOI: [10.3390/app9204462](https://doi.org/10.3390/app9204462)

Ivanov V, Chu J. 2008. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, *Rev. Envir. Sc. & Biotechn.* **7**(2): 139-153.

Ivanov V, Chu J, Stabnikov V, He J, Naeimi M. 2010. Iron-based bio-grout for soil improvement and land reclamation. *Proc. 2<sup>nd</sup> IC Sustainable Construction Materials and Technologies*, Italy: 415-420

Jacobs, L.W. and McCreary, D.S. (2001) Utilizing Biosolids on Agricultural Land. Michigan State University: Department of Crop and Soil Sciences - Michigan State University.

Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A., Kopriva S. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. *Front. Plant Sci.* **8**, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>

Jenicek, P. et al. (2010) 'Advantages of anaerobic digestion of sludge in microaerobic conditions', *Water Science and Technology*, 62(2), pp. 427–434. Available at: <https://doi.org/10.2166/wst.2010.305>.

Jiang N-J, Wang Y-J, Chu J, Kawasaki S, Tang C-S, Cheng L, Du Y-J, Shashank BS, Singh DN, Han X-L, Wang Y-Z. 2021. Bio-mediated soil improvement: An introspection into processes, materials, characterization and applications. *Soil use and Management* **00**: 1-26. <https://doi.org/10.1111/sum.12736>

Jonkers HM, Thijssen A, Muyzer G, Copuroglu O, Schlangen E. 2010. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, *Ecological Engineering* 36: 230–235. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2008.12.036](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036)

Jørgensen, F.A. and Jørgensen, D. (2021) 'Citizen science for environmental citizenship', *Conservation Biology*. John Wiley and Sons Inc, pp. 1344–1347. Available at: <https://doi.org/10.1111/cobi.13649>.

Khan, M.M. et al. (2020) 'Urban horticulture for food secure cities through and beyond covid-19', *Sustainability* (Switzerland). MDPI, pp. 1–21. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12229592>.

Kammenaya NA, Ajo-Franklin CM, Northern T, Jansson C. 2012. Cyanobacteria as Biocatalysts for Carbonate Mineralization, *Minerals* **2**: 338-364. DOI: [10.3390/min2040338](https://doi.org/10.3390/min2040338)

Kannoja P., Choudhary K.K., Srivastava A.K., Singh A.K. (2019). PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture. Elsevier, Duxford, UK

Karol R. 2003. *Chemical grouting and soil stabilization*, Third Edition, Revised and Expanded, CRC Press, Taylor and Francis Group. ISBN 9780824740658

Katan J. (2017). Diseases caused by soilborne pathogens: Biology, management and challenges. *Journal of Plant Pathology*, 99(2), 305–315. <https://doi.org/10.4454/jpp.v99i2.3862>

Kavroulakis N., Ehaliotis C., Ntougias S., Zervakis G.I., Papadopoulou K.K. (2005). Local and systemic resistance against fungal pathogens of tomato plants elicited by a compost derived from agricultural residues. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 66(5), 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2005.06.003>

Kavroulakis N., Papadopoulou K.K., Ntougias S., Zervakis G.I., Ehaliotis C. (2006). Cytological and other aspects of pathogenesis-related gene expression in tomato plants grown on a suppressive compost. *Ann. Bot.* 98, 555–564. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl149>

Kim D, Park K, Kim D. 2014. Effects of Ground Conditions on Microbial Cementation in Soils, *Materials* **7**: 143-156. DOI: [10.3390/ma7010143](https://doi.org/10.3390/ma7010143)

Kumar, V., Chopra, A.K. and Srivastava, S. (2016) 'Assessment of Heavy Metals in Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Grown in Sewage Sludge–Amended Soil', *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(2), pp. 221–236. Available at: <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1122799>.



- Kumari D, Qian X-Y, Pan X, Achal V, Li Q, Gadd GM. 2016. Microbially-induced Carbonate Precipitation for Immobilization of Toxic Metals, Chapter 2 in *Advances in Applied Microbiology* **94**: 79-108. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.aambs.2015.12.002>
- Lezzi B, Brady R, Sardag S, Eu B, Skerlos S. 2019. Growing bricks: Assessing biocement for lower embodied carbon structures, Proc. 26<sup>th</sup> CIRP Life Cycle Engineering Conference. DOI: [10.1016/j.procir.2019.01.061](https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.061)
- Lewenstein, B. V (2004) What does citizen science accomplish? Available at: <https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/68ed3b1d-fb23-4056-947d-cfdda376f175/content>
- Lin H, Suleiman M, Brown D, Kavazanjian Jr. 2016. Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation, *J. Geot. Geoenv. Eng.* **142**(2): 04015066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001383](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001383)
- Liu L, Liu H, Stuedlein AW, Evans TM, Xiao Y. 2019. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand, *Can. Geotech. J.* **56**(10): 1502-1513. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0007>
- Lin L., Xu F., Ge X., Li Y. (2018). Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **89**, 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.025>
- Lin W.Y., Ng W.C., Wong B.S.E., Teo S.L.M., Sivananthan G.d/o, Baeg G.H., Ok Y.S., Wang C.H. (2018). Evaluation of sewage sludge incineration ash as a potential land reclamation material. *J. Hazard. Mater.* **357**, 63-72 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.05.047>
- Liu, M. et al. (2018) 'Effects of sintering temperature on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment', *Journal of Alloys and Compounds*, **748**, pp. 522–527. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.216>.
- Lleó, T. et al. (2013) 'Home and vermicomposting as sustainable options for biowaste management', *Journal of Cleaner Production*, **47**, pp. 70–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.011>.
- Lloyd AB, Sheaffe MJ. 1973. Urease activity in soils, *Plant and Soil* **39**: 71-80
- Ma L, Pang AP, Luo Y, Lu X, Lin F. 2020. Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium *Sporosarcina pasteurii*, *Microbial Cell Factories* **19**: 12. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-1281-z>
- Mahawish A, Bouazza A, Gates W. 2018. Improvement of coarse sand engineering properties by microbially induced calcite precipitation, *Geomicrobiology J.* **35**(10): 887-897. <https://doi.org/10.1080/01490451.2018.1488019>
- Majumder, R. et al. (2014) 'Biosolid stockpiles are a significant point source for greenhouse gas emissions', *Journal of Environmental Management*, **143**, pp. 34–43. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.016>.
- Manzetti, S. and van der Spoel, D. (2015) 'Impact of sludge deposition on biodiversity', *Ecotoxicology*, **24**(9), pp. 1799–1814. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10646-015-1530-9>.
- Maulini-Duran, C. et al. (2013) 'A systematic study of the gaseous emissions from biosolids composting: Raw sludge versus anaerobically digested sludge', *Bioresource Technology*, **147**, pp. 43–51. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.118>.
- Meng H, Gao Y, He J, Qi Y, Hang L. 2020. Microbially induced carbonate precipitation for wind erosion control of desert soil: Field-scale tests, *Geoderma* **383**: 114723. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114723>
- Metcalf & Eddy (2017). Μηχανική Υγρών Αποβλήτων (Τόμος Α). Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, ISBN: 9789604181094
- Miller-Robbie, L. et al. (2015) 'Life cycle energy and greenhouse gas assessment of the co-production of biosolids and biochar for land application', *Journal of Cleaner Production*, **91**, pp. 118–127. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.050>.
- Mininni, G. et al. (2015) 'EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management', *Environmental Science and Pollution Research*, **22**(10), pp. 7361–7374. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3132-0>.

Mitchell J, Santamarina J. 2005. Biological considerations in geotechnical engineering, *J. Geot. Geoenviron. Eng.* **131**(10): 1222-1233. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222))

Mobley HLT, Hausinger RP. 1989. Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization, *Microbiological Reviews* **53**(1): 85-108

Montoya B.M. 2008. Bio-Mediated Soil Improvement and the Effect of Cementation on the Behavior, *Improvement, and Performance of Sand*, PhD thesis, University of California, Davis

Montoya B, DeJong J, Boulanger R. 2013. Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation, *Géotechnique* **63**(4): 302-312. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.019>

Moretti, S.M.L. et al. (2016) 'Concentration of Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, and Pb in soil, sugarcane leaf and juice: residual effect of sewage sludge and organic compost application', *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(3), p. 163. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5170-1>.

Mujah D, Shahin MA, Cheng L. 2016. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization, *Geomicrobiology J.* **34**(6): 524-537. <http://dx.doi.org/10.1080/01490451.2016.1225866>

Mujah D, Cheng L, Shahin MA. 2019. Microstructural and geo-mechanical study on bio-cemented sand for optimization of MICP process, *J. Materials in Civil Eng.* **31**(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002660](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002660)

Muki Haklay (2018) Citizen Science, Citizen Science. UCL Press. Available at: <https://doi.org/10.14324/111.9781787352339>.

Neofotistos, M. et al. (2023) 'A Real-World Scenario of Citizens' Motivation and Engagement in Urban Waste Management Through a Mobile Application and Smart City Technology', *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), pp. 221–239. Available at: <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00155-z>.

Okwadha G, Li J. 2010. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation, *Chemosphere* **81**(9): 1143-1148. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.066>

Peng J, Liu Z. 2019. Influence of temperature on microbially induced calcium carbonate precipitation for soil treatment, *PLoS ONE* **14**(6): e0218396. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218396>

Pinto Z.V., Morandi M.A.B., Bettiol W. (2013). Induction of suppressiveness to Fusarium wilt of chrysanthemum with composted sewage sludge. *Trop. Plant Pathol.* **38**, 414–422. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762013005000026>

Plummer NL, Busenberg E. 1982. The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **46**: 1011-1040. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90056-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90056-4)

Praspaliauskas, M. and Pedišius, N. (2017) 'A review of sludge characteristics in Lithuania's wastewater treatment plants and perspectives of its usage in thermal processes', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, pp. 899–907. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.041>.

Prosser, R.S., Trapp, S. and Sibley, P.K. (2014) 'Modeling Uptake of Selected Pharmaceuticals and Personal Care Products into Food Crops from Biosolids-Amended Soil', *Environmental Science & Technology*, 48(19), pp. 11397–11404. Available at: <https://doi.org/10.1021/es503067v>.

Ran D, Kawasaki S. 2016. Effective Use of Plant-Derived Urease in the Field of Geoenvironmental/Geotechnical Engineering, *J. Civil Environ. Eng.* **6**(1): 1000207. <http://dx.doi.org/10.4172/2165-784X.1000207>

Rivière, D. et al. (2009) 'Towards the definition of a core of microorganisms involved in anaerobic digestion of sludge', *The ISME Journal*, 3(6), pp. 700–714. Available at: <https://doi.org/10.1038/ismej.2009.2>.

Rosenfeld, P.E. et al. (2001) 'Comparison of Odor Emissions from Three Different Biosolids Applied to Forest Soil', *Water, Air, and Soil Pollution*, 127(1), pp. 173–191. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1005286429528>.

Rossiter, D.G. et al. (2015) 'Can citizen science assist digital soil mapping?', *Geoderma*, 259–260, pp. 71–80. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.006>.

Sablayrolles, C., Gabrielle, B. and Montrejaud-Vignoles, M. (2010) 'Life Cycle Assessment of Biosolids Land Application and Evaluation of the Factors Impacting Human Toxicity through Plant Uptake',

*Journal of Industrial Ecology*, 14(2), pp. 231–241. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00222.x>.

Schachtman D.P., Reid R.J., Ayling S.M. (1998). Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiol.* 116, 447–453. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>

Scotti R., Bonanomi G., Scelza R., Zoina A., Rao M.A. (2015). Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 15(2), 333–352. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000031>

Seed H. 1979. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes, *J. Geot. Geoenv. Eng. ASCE* **105** (GT2): 201–255

Skondras, A. et al. (2022) ‘Global Citizen Science Programs and Their Contribution to the Sustainable Development Goals’, in, pp. 132–151. Available at: <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-4829-8.ch007>.

Vasiliades, M.A. et al. (2021) ‘A systematic literature review on the participation aspects of environmental and nature-based citizen science initiatives’, *Sustainability* (Switzerland). MDPI AG. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13137457>.

Sloan, J.J. et al. (2016) ‘Improving the Physical and Chemical Properties of a Disturbed Soil Using Drying-bed Biosolids’, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(11), pp. 1451–1464. Available at: <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1179751>.

Stavridou E., Giannakis I., Karamichali I., Kamou N.N., Lagiotis G., Madesis P., Emmanouil C., Kungolos A., Nianiou-Obeidat I., Lagopodi A. (2021). Biosolid-amended soil enhances defense responses in tomato based on metagenomic profile and expression of pathogenesis-related genes. *Plants* 10(12), 2789. <https://doi.org/10.3390/plants10122789>

Stewart-Wade S.M. (2020). Efficacy of organic amendments used in containerized plant production: Part 1 – Compost-based amendments. *Sci. Hortic.* 266, 108856. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108856>

Stocks-Fischer S, Galinat JK, Bang SS. 1999. Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>, *Soil Biology and Biochemistry* **31**: 1563–1571

TCHOBANOGLOUS, G. and KREITH, F. (2018) ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ. 2nd edn. Εκδόσεις Τζιόλα (1, 1). Available at: <https://www.tziola.gr/> (Accessed: 3 July 2023).

Terzis D, Laloui L. 2019. A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: A review. *Geomech. Energy & Envir.* DOI: [10.1016/j.gete.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.001)

Tian, G. et al. (2016) ‘Assessment of plant availability and environmental risk of biosolids-phosphorus in a U.S. Midwest Corn-Belt Soil’, *Journal of Environmental Management*, 172, pp. 171–176. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.031>.

Torres-Aravena AE, Duarte-Nass C, Azocar L, Mella-Herrera R, Rivas M, Jeison D. 2016. Can microbially induced calcite precipitation (MICP) through a ureolytic pathway be successfully applied for removing heavy metals from wastewaters?, *Crystals* **8**(11): 438. <https://doi.org/10.3390/cryst8110438>

Torri S.I., Correa R.S., Renella G. (2017). Biosolid Application to Agricultural Land—a Contribution to Global Phosphorus Recycle: A Review. *Pedosphere* 27(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60106-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60106-0)

Tubeileh A.M., Stephenson G.T. (2020). Soil amendment by composted plant wastes reduces the *Verticillium dahliae* abundance and changes soil chemical properties in a bell pepper cropping system. *Curr. Plant Biol.* 22, 100148. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100148>

Tyagi, V.K. and Lo, S.-L. (2011) ‘Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: an up to date review’, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 10(3), pp. 215–242. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11157-011-9244-9>.

van Paassen L. 2009. *BiogROUT-ground improvement by microbially induced carbonate precipitation*, PhD Dissertation, Delft University of Technology, Holland

van Paassen L, Montano D, Staal M, Sorokin D, van der Zon W, van Loosdrecht M. 2010. Potential soil reinforcement by biological denitrification, *Ecolog. Eng.* **36**(2): 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.026>

- Venuleo S, Laloui L, Terzis D, Hueckel T, Hassan M. 2016. Effect of microbially induced calcite precipitation on soil thermal conductivity, *Géotechnique Letters* **00**: 1-6. <http://dx.doi.org/10.1680/jgele.15.00125>
- Vohland, K. et al. (2021) The Science of Citizen Science. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_1)
- Vranna A, Tika T. 2019. Laboratory improvement of liquefiable sand by colloidal silica and weak cementation, *Ground Improvement*. <https://doi.org/10.1680/jgrim.19.00019>
- Vranna A, Tika T. 2020a. Laboratory investigation into the monotonic and cyclic behaviour of a clean sand stabilised with colloidal silica, *Géotechnique* 0016-8505. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.213>
- Vranna A, Tika T. 2020b. Undrained monotonic and cyclic response of a weakly cemented sand, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **146**(5): 04020018. DOI: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002246)
- Yacamán, C. and Ebel, R. (no date) Urban horticulture for sustainable food systems.
- Wadsworth R., Hallett S., Sakrabani R. (2018). Phosphate acceptance map: A novel approach to match phosphorus content of biosolids with land and crop requirements. *Agric. Syst.* 166, 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.07.015>
- Wang, H. et al. (2008) 'Technological options for the management of biosolids', *Environmental Science and Pollution Research - International*, 15(4), pp. 308–317. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0012-5>
- Wang L, Chu J, Wu S, Wang H. 2021. Stress–dilatancy behavior of cemented sand: comparison between bonding provided by cement and biocement, *Acta Geotechnica* **16**:1441–1456. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01146-4>
- Wang Z, Zhang N, Ding J, Li Q, Xu J. 2020. Thermal conductivity of sands treated with microbially induced calcite precipitation (MICP) and model prediction, *Int. J. Heat & Mass Transfer* **147**. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118899](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118899)
- Wei S, Cui H, Jiang Z, Liu H, He H, Fang N. 2015. Biomineralization processes of calcite induced by bacteria isolated from marine sediments, *Brazilian J. Microbiology* **46**(2): 455-464. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-838246220140533>
- Whiffin VS. 2004. *Microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation for the production of biocement*, PhD Dissertation, Murdoch University, Perth, Western Australia
- Whiffin VS, Lambert JWM, Derk van Ree CC. 2005. Biogrout and Biosealing - Pore-Space Engineering with Bacteria, *Geo-strata-Geo Institute of ASCE* **5**(5): 13-16,36.
- 'Working Document on Sludge - 3rd Draft. Brussels' (2000). European Union. Available at: [https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/uso-dei-fanghi-di-depurazione-in-agricoltura-attivita-di-controllo-e-vigilanza-del-territorio/files/3rd\\_Draft\\_sludge\\_en.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/uso-dei-fanghi-di-depurazione-in-agricoltura-attivita-di-controllo-e-vigilanza-del-territorio/files/3rd_Draft_sludge_en.pdf).
- Xiao P, Liu H, Stuedlein A, Evans T, Xiao Y. 2018. Effect of relative density and bio-cementation on the cyclic response of calcareous sand, *Can. Geot. J.* **56**(12): 1849-1862. <https://doi.org/10.1139/cgi-2018-0573>
- Xiao P, Liu H, Xiao Y, Stuedlein AW, Evans TM. 2019. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **107**: 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.008>
- Xiao Y, Wang Y, Wang S, Evans TM, Stuedlein AW, Chu J, Chang Z, Wu H, Liu H. 2021. Homogeneity and mechanical behaviors of sands improved by a temperature-controlled one-phase MICP method, *Acta Geotechnica* **16**: 1417–1427. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01122-4>
- Yoon J-H, Lee K-C, Weiss N, Kho Y-H, Kang K-H, Park Y-H. 2001. *Sporosarcina aquimarina* sp. nov., a bacterium isolated from seawater in Korea, and transfer of *Bacillus globisporus* (Larkin and Stokes 1967), *Bacillus psychrophilus* (Nakamura 1984) and *Bacillus pasteurii* (Chester 1898) to the genus *Sporosarcina* as *Sporosarcina globispora* comb. nov., *Sporosarcina psychrophila* comb. nov. and *Sporosarcina pasteurii* comb. nov., and emended description of the genus *Sporosarcina*. *J. Systematic and Evolutionary Microbiology* **51**, 1079–1086.



Yu T, Souli H, Péchaud Y, Fleureau J-M. 2022. Optimizing protocols for microbial induced calcite precipitation (MICP) for soil improvement—a review, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **26**(6), 2218-2233, DOI: [10.1080/19648189.2020.1755370](https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1755370)

Zamani A, Montoya B. 2018. Undrained monotonic shear response of MICP-treated silty sands, *J. Geot. Geoenv. Eng. ASCE* **144**(6): 04018029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001861)

Zhang, H. et al. (2019) 'Environmental and economic assessment of electro-dewatering application to sewage sludge: A case study of an Italian wastewater treatment plant', *Journal of Cleaner Production*, 210, pp. 1180–1192. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.044>.

### Ελληνική Βιβλιογραφία

Βράννα Α. 2016. *Laboratory investigation into the behaviour of improved liquefiable soils under monotonic and cyclic loading* [in Greek] PhD Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Aristotle Univ. of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

Γιαννάκης, Ι. (2021) *Αξιολόγηση της χρήσης βιοστερεών από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ως εδαφοβελτιωτικών και φυτοπροστατευτικών μέσων στην κατεύθυνση της κυκλικής οικονομίας* (Διδακτορική διατριβή) Ανακτήθηκε από: <https://ikee.lib.auth.gr/record/337332?ln=el>

Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (1986) *Οδηγία 86/278/ΕΟΚ για χρήση της λάσπης στη γεωργία*, 86/278/ΕΟΚ.

Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (1991) *Μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για την χρησιμοποίηση στη γεωργία της ιλύος που προέρχεται από επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων* (ΦΕΚ 641/Β/7-08-1991), ΚΥΑ 8056842251991.

Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (1997) *Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων*, ΥΑ 5673/400/1997.

Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (2014) *Κοινή Υπουργική Απόφαση οικ.56366/4351/2014 - ΦΕΚ 3339/Β/12-12-2014, Κοινή Υπουργική Απόφαση Αριθμ. οικ.56366/4351/2014*. Available at: <https://www.et.gr/SearchFek> (Accessed: 3 July 2023).

Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (2015) *Τροποποίηση και έγκριση του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων (Ε.Σ.Δ.Α.) και του Εθνικού Στρατηγικού Σχεδίου Πρόληψης Δημιουργίας Αποβλήτων που κυρώθηκαν με την 51373/4684/25-11-2015 κοινή απόφαση των Υπουργών Εσωτερικών και Διοικητικής Ανασυγκρότησης και Περιβάλλοντος και Ενέργειας, σύμφωνα με το άρθρο 31 του Ν. 4342/2015., ΠΥΣ 49/2015.*

Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (2023) *Μέτρα, όροι και διαδικασίες για τη χρησιμοποίηση επεξεργασμένης ιλύος στη γεωργία και στην αποκατάσταση του εδάφους - Συμμόρφωση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 86/278/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 12ης Ιουνίου 1986 «σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά τη χρησιμοποίηση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία», όπως τροποποιήθηκε με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2019/1010 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 5ης Ιουνίου 2019 και αντικατάσταση της υπ' αρ. 80568/4225/1991 (Β' 641) κοινής υπουργικής απόφασης., Κοινή Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ ΔΔΑ418286302023.*

Κούγκολος Α., Σαμολαδά Μ. (2018) *Νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα. Available at: <https://www.tziola.gr/> (Accessed: 3 July 2023).

Κούγκολος Α. (2018) *Περιβαλλοντική Μηχανική. Ρύπανση Και Προστασία Περιβάλλοντος*. 2nd Edn. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα. Available At: <https://Www.Tziola.Gr/> (Accessed: 3 July 2023).

Κουλουμπής Π., Τσαντίλας Χ. (2008). *Εγχειρίδιο Ορθής Γεωργικής Πρακτικής για την Ενδεδειγμένη Αξιοποίηση της Ιλύος των Αστικών Λυμάτων, Περιληπτική Θεώρηση*, Έκδ. 1η, Εκδόσεις Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων Αθήνα, ISBN: 978-960-00-2015-1

Μαρκαντωνάτος Γ. (1990) *Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων*. 2nd edn. Αθήνα: Εκδόσεις Γαρταγάνης (1, 1). Available at: <https://metabook.gr/books/epekserghasia-kai-diathesi-ighrwn-apovlition-grighoris-markantonatos-123188> (Accessed: 3 July 2023).

Νταρακάς Ε. (2016). *Τεχνική Περιβάλλοντος – Διεργασίες Επεξεργασίας Νερού και Υγρών Αποβλήτων*. Εκδόσεις σοφία, Θεσσαλονίκη, ISBN: 978-960-6706-91-2



Τσώνης Σ. (2004) *Επεξεργασία Λυμάτων*. 1st edn. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου (1, 1). Available at: <https://ekdoseis-papasotiriou.gr/products/9789607530516-tsonis-stulianos-epexergasia-lumaton> (Accessed: 3 July 2023).

#### **Ιστοσελίδες**

<https://co-citi-sense.wp2.nilu.no/> (18/09/2023)

<https://www.ecsa.ngo/cases/imermaid/> (18/09/2023)

<https://cshub.auth.gr/> (29/09/2023)

<https://unric.org/el/17> (29/09/2023)

<https://growobservatory.org/> (29/09/2023)

<https://cordis.europa.eu/project/id/690199> (29/09/2023)