



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΕΛΕΧΩΝ
ΠΟΛΙΟΪΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Σαραλή Αναστασία

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Κυριακοπούλου Ζαχαρούλα

Λάρισα, Ιούνιος, 2025

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πολιομυελίτιδα είναι μια ιογενής νόσος που προκαλείται από τον πολιοϊό, μέλος της οικογένειας Picornaviridae. Μεταδίδεται κυρίως μέσω της κοπρανοστοματικής οδού και προσβάλλει κυρίως τα παιδιά, προκαλώντας σε σοβαρές περιπτώσεις παράλυση ή και θάνατο. Παρά τη δραστική μείωση των κρουσμάτων από τη δεκαετία του 1950 με την εισαγωγή των εμβολίων Salk και Sabin, ο ιός εξακολουθεί να κυκλοφορεί σε περιοχές όπως το Πακιστάν και το Αφγανιστάν. Από το 1988, η GPEI (Παγκόσμια Πρωτοβουλία για την εξάλειψη της πολιομυελίτιδας) έχει συμβάλει στη μείωση των παγκόσμιων περιστατικών κατά 99%. Ωστόσο, γεωπολιτικές και κοινωνικοοικονομικές δυσκολίες εξακολουθούν να εμποδίζουν την πλήρη εκρίζωση.

Η περιβαλλοντική επιτήρηση έχει αναδειχθεί σε βασικό εργαλείο ανίχνευσης του ιού, κυρίως μέσω της ανάλυσης υγρών αποβλήτων. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ανίχνευση της κυκλοφορίας του πολιοϊού ακόμη και χωρίς την ύπαρξη κλινικών κρουσμάτων, καθιστώντας δυνατή την έγκαιρη επέμβαση. Τεχνικές όπως η RT-PCR, η ισοθερμική ενίσχυση γονιδίων και η αλληλούχιση επόμενης γενιάς (NGS) χρησιμοποιούνται ευρέως για τη διάγνωση και τον χαρακτηρισμό των στελεχών πολιοϊών. Η εφαρμογή περιβαλλοντικής επιτήρησης σε χώρες όπως η Ινδία και η Νιγηρία έχει οδηγήσει σε ενίσχυση των προγραμμάτων εμβολιασμού και στην αποτελεσματικότερη πρόληψη της εξάπλωσης του ιού.

Ωστόσο, η εφαρμογή της επιτήρησης υγρών αποβλήτων δεν είναι καθολική. Το υψηλό κόστος ανάλυσης, η ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού, η έλλειψη υποδομών αποχέτευσης και η κοινωνική καχυποψία σε ορισμένες περιοχές αποτελούν σημαντικά εμπόδια. Παρά τις προκλήσεις, η περιβαλλοντική επιτήρηση παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμη ως συμπληρωματικό εργαλείο της επιδημιολογικής παρακολούθησης, παρέχοντας δεδομένα χαμηλού κόστους για μεγάλες πληθυσμιακές ομάδες. Οι μελλοντικές προοπτικές περιλαμβάνουν την ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας, την ανάπτυξη οικονομικότερων και ταχύτερων μεθόδων ανίχνευσης, καθώς και τη συνδυαστική εφαρμογή τεχνολογιών όπως η τεχνική νοημοσύνη και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Η εξάλειψη της πολιομυελίτιδας αποτελεί ένα φιλόδοξο αλλά ρεαλιστικό στόχο, με την περιβαλλοντική επιτήρηση να διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στις παγκόσμιες στρατηγικές δημόσιας υγείας.

Λέξεις – Κλειδιά

Πολιομυελίτιδα, Πολιοϊός, Περιβαλλοντική επιτήρηση, Εμβολιασμός, Στελέχη πολιοϊών (WPV, VDPV), Global Polio Eradication Initiative (GPEI)

ABSTRACT

Poliomyelitis is a viral disease caused by poliovirus, a member of the Picornaviridae family. It is primarily transmitted through the fecal-oral route and mainly affects children, potentially causing paralysis or even death in severe cases. Despite a significant reduction in cases since the 1950s, following the introduction of the Salk and Sabin vaccines, poliovirus remains endemic in areas such as Pakistan and Afghanistan. Since 1988, the Global Polio Eradication Initiative (GPEI) has contributed to a 99% decrease in global cases. However, geopolitical instability and socioeconomic challenges continue to hinder complete eradication.

Environmental surveillance has emerged as a key tool for detecting poliovirus circulation, primarily through wastewater analysis. This method enables the identification of viral circulation even in the absence of clinical cases, allowing for timely intervention. Techniques such as RT-PCR, isothermal gene amplification, and next-generation sequencing (NGS) are widely used to diagnose and characterize poliovirus strains. Implementation of environmental surveillance in countries like India and Nigeria has strengthened immunization programs and improved prevention of viral spread. Nevertheless, the implementation of wastewater surveillance is not universal. The high cost of analysis, the requirement for trained personnel, limited sewage infrastructure, and social mistrust in some regions are significant obstacles. Despite these challenges, environmental surveillance remains highly valuable as a complementary tool to epidemiological monitoring, offering low-cost data collection for large population groups.

Future perspectives include strengthening international cooperation, developing faster and more affordable detection methods, and integrating advanced technologies such as artificial intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT). These tools can enhance data analysis and predict outbreaks more effectively, especially in underserved areas. Community engagement and public awareness also play a critical role in the success of surveillance programs. The complete eradication of poliomyelitis is an ambitious yet realistic goal. Achieving this objective depends on maintaining high vaccination coverage, effective virus monitoring, and immediate response to emerging cases—both clinical and environmental. As a public health strategy, environmental surveillance offers significant insights not only for polio control but also for the broader management of infectious diseases, contributing to global preparedness and response efforts.

Keywords

Poliomyelitis, poliovirus, environmental surveillance, vaccination, poliovirus strains (WPV, VDPV), Global Polio Eradication Initiative (GPEI)

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	8
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΟΛΙΟΜΥΕΛΙΤΙΔΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΠΟΛΙΟΙΟΥΣ	9
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΟΜΥΕΛΙΤΙΔΑΣ.....	9
1.2 ΕΠΙΔΗΜΙΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ.....	12
1.3 ΕΜΒΟΛΙΑΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ.....	18
1.4 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ.....	20
2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ ΠΟΛΙΟΙΩΝ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	22
2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	22
2.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	24
2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΓΟΝΙΔΙΩΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΛΙΟΪΟΥ	26
2.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΡΜΗΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	28
3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	30
3.1 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΡΟΟΔΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΑΛΕΙΨΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΟΜΥΕΛΙΤΙΔΑΣ	30
3.2 ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΕΣ ΑΝΑΖΩΠΥΡΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ	33
3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΠΙΔΗΜΙΟΛΟΓΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ.....	35
3.3.1 ΠΛΑΙΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΑΝΕΠΙΤΥΓΜΕΝΑ ΚΡΑΤΗ.....	37
3.3.2 ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ – ΜΕΣΑΙΟΥ ΕΙΣΟΔΗΜΑΤΟΣ.....	39
3.3.3 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΣ ΣΕ ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WBE.....	41
3.3.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	44
3.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ WPV3 ΣΕ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ: ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΗΣ ΟΛΛΑΝΔΙΑΣ	45
3.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΑΝΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ.....	47
4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ	49
4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ.....	49
4.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ, ΘΕΣΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	53
4.3 ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΛΗΨΗ ΕΠΙΔΗΜΙΩΝ	56
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	58
5.1 Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ ΩΣ ΠΟΛΥΤΙΜΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ	58

5.2	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΠΟΛΙΟΪΩΝ	59
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Η πορεία του πολιοϊού στο ανθρώπινο σώμα, από την είσοδο του στόματος και τη μόλυνση των εντερικών κυττάρων, έως την εξάπλωση στο κεντρικό νευρικό σύστημα και την καταστροφή των κινητικών νευρώνων, οδηγώντας σε παράλυση (Jayche et al., 2024). Σελ. 10

Εικόνα 2: Παγκόσμιος χάρτης χωρών με ενδημική κυκλοφορία WPV1 και επιδημίες cVDPVs κατά την περίοδο 2021-2024 (Bricks et al., 2024). Σελ. 13

Εικόνα 3: Παγκόσμιος χάρτης χωρών που έχουν εφαρμόσει περιβαλλοντική επιτήρηση ή προγράμματα δειγματοληψίας για πολιοϊό (Asghar et al., 2014). Σελ. 15

Εικόνα 4: Χώρες που αναφέρουν, δείγματα που συλλέχθηκαν και ελέγχθηκαν για εντεροϊούς, καθώς και δείγματα που βρέθηκαν θετικά για εντεροϊό ανά έτος και σύστημα επιτήρησης (Harvala et al., 2025). Σελ. 23

Εικόνα 5: Σύνοψη των τεχνολογιών αλληλούχισης, ερευνητικών στόχων, προκλήσεων και ευκαιριών που συνδέονται με την εφαρμογή της αλληλούχισης νέας γενιάς (NGS) στην επιδημιολογία βασισμένη στα υγρά απόβλητα (WBE) (Farkas et al., 2025).

Σελ. 25

Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση των βασικών εργαστηριακών σταδίων της περιβαλλοντικής επιτήρησης πολιοϊού, σύμφωνα με το πρωτόκολλο του ΠΟΥ (Bubba et al., 2023). Σελ. 26

Εικόνα 7: Συνολικός αριθμός εκστρατειών συμπληρωματικού εμβολιασμού με mOPV2 (SIAs) στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό ανά υγειονομική περιφέρεια, σε απάντηση σε επιδημίες cVDPV2 (Ιούνιος 2017-Απρίλιος 2021) (Alleman et al., 2023). Σελ. 40

Εικόνα 8: Επισκόπηση των εθνικών και περιφερειακών συστημάτων πολυπαραμετρικής επιτήρησης υγρών αποβλήτων σε 10 ευρωπαϊκές χώρες για παθογόνα πλην του SARS - CoV-2. Συμπεριλαμβάνεται η παρακολούθηση του πολιοϊού σε Φινλανδία και Ολλανδία, στο πλαίσιο ολιστικών στρατηγικών WBE (Benedetti et al., 2024). Σελ. 43

Εικόνα 9: Γεωγραφική κατανομή των κρουσμάτων cVDPV2 που εντοπίστηκαν μέσω AFP και θετικών δειγμάτων από περιβαλλοντική επιτήρηση κατά την περίοδο 2016-2020 (Cooper et al., 2025). Σελ. 50

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

AFP – Acute Flaccid Paralysis – Οξεία Χαλαρή Παράλυση

AI - Artificial Intelligence – Τεχνητή Νοημοσύνη

AEM - Applied and Environmental Microbiology

CDC - Centers for Disease Control and Prevention – Κέντρα Ελέγχου και Πρόληψης Νοσημάτων (ΗΠΑ)

cVDPV - Circulating Vaccine-Derived Poliovirus – Κυκλοφορούν παράγωγο εμβολίου πολιοϊού

DRC - Democratic Republic of the Congo – Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό

ECDC - European Centre for Disease Prevention and Control – Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόληψης και Ελέγχου Νόσων

ES - Environmental Surveillance – Περιβαλλοντική Επιτήρηση

GPEI - Global Polio Eradication Initiative – Παγκόσμια Πρωτοβουλία Εξάλειψης της Πολιομυελίτιδας

mOPV2 - Monovalent Oral Poliovirus Vaccine type 2 – Μονοδύναμο από του στόματος εμβόλιο τύπου 2

nOPV2 - Novel Oral Poliovirus Vaccine type 2 – Νεότερο από του στόματος εμβόλιο τύπου 2

NPEV - Non-Polio Enteroviruses – Μη πολιοϊκοί εντεροϊοί

PEF - Poliovirus Essential Facility – Εγκατάσταση Κρίσιμης Σημασίας για Πολιοϊό

PMMoV - Pepper Mild Mottle Virus – Ιός πιπεριάς που χρησιμοποιείται ως δείκτης κοπρανωδών φορτίων

RT-PCR - Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction – Αντίστροφη Μεταγραφή-Αλυσιδωτή Αντίδραση Πολυμεράσης

SARS-CoV-2 - Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 – Ο ιός του COVID-19

VDPV - Vaccine-Derived Poliovirus – Παράγωγος πολιοϊός από εμβόλιο

WASH - Water, Sanitation and Hygiene – Νερό, Αποχέτευση και Υγιεινή

WBE - Wastewater-Based Epidemiology – Επιδημιολογία βασισμένη σε υγρά απόβλητα

WHO - World Health Organization – Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

WPV - Wild Poliovirus – Άγριος Πολιοϊός

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΟΛΙΟΜΥΕΛΙΤΙΔΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΠΟΛΙΟΙΟΥΣ

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΟΜΥΕΛΙΤΙΔΑΣ

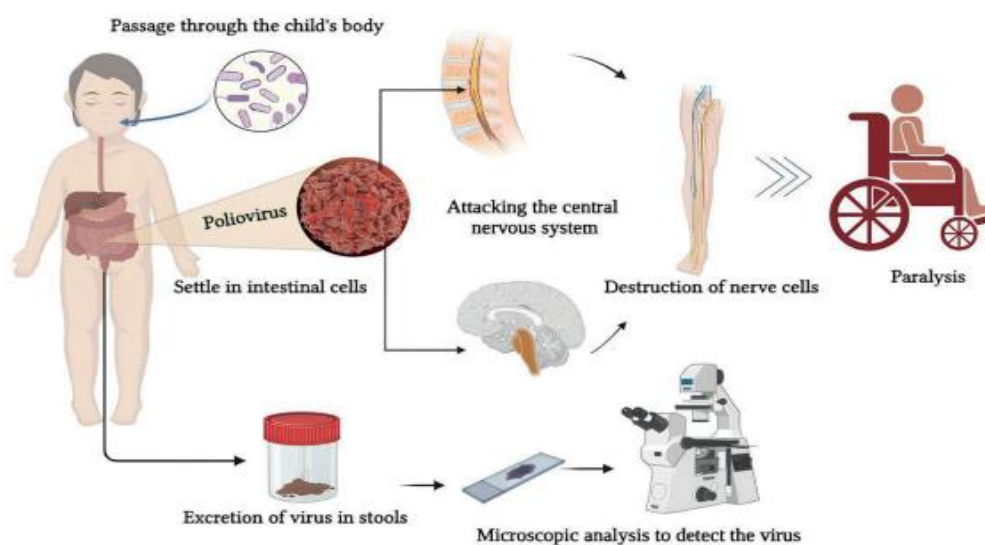
Η πολιομυελίτιδα αποτελεί μία από τις πλέον ιστορικά και ιατρικά σημαντικές λοιμώδεις νόσους του ανθρώπου. Πρόκειται για οξεία ιογενή νόσο που προσβάλλει κυρίως τα νεύρα του νωτιαίου μυελού και μπορεί να προκαλέσει παράλυση ή ακόμα και θάνατο. Ο αιτιολογικός παράγοντας της νόσου είναι ο πολιοϊός (Poliovirus), ένας εντεροϊός του γένους Enterovirus και της οικογένειας Picornaviridae, ο οποίος ανήκει στην ομάδα των ιών RNA θετικής πολικότητας, χωρίς περίβλημα, με εξαιρετική σταθερότητα στο περιβάλλον (Duizer et al., 2023; Yang et al., 2023).

Οι πολιοϊοί είναι πολύ μικροί ιοί, με διάμετρο περίπου 27–30 nm. Το γονιδίωμα τους είναι θετικής πολικότητας μονόκλωνο RNA και περιβάλλεται μόνο από πρωτεϊνικό καψίδιο, χωρίς λιπιδικό φάκελο, γεγονός που ενισχύει την ανθεκτικότητά τους στο περιβάλλον (Adu, 2005). Έτσι, μπορούν να επιβιώσουν σε υγρά απόβλητα για εβδομάδες και να μεταδοθούν μέσω του νερού, παραμένοντας μολυσματικοί σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Είναι επίσης ανθεκτικοί στη γαστρική οξύτητα, χαρακτηριστικό που τους διευκολύνει να επιβιώσουν κατά τη διέλευση από τον γαστρεντερικό σωλήνα και να αποβληθούν με τα κόπρανα, συμβάλλοντας στην κυκλοφορία τους μέσω της κοπρανοστοματικής οδού (Kitakawa et al., 2023). Υπάρχουν τρεις ορότυποι του πολιοϊού: ο PV1, ο οποίος ανιχνεύεται πλέον πολύ σπάνια, κυκλοφορεί μόνο σε Αφγανιστάν και Πακιστάν, καθώς και ο PV2, ο οποίος έχει πλέον εξαλειφθεί παγκοσμίως από το 2015 και ο PV3, στον οποίο, έχει να γίνει ανίχνευση του από το 2012 (Greene et al., 2019)). Παρά τη φαινομενική εξάλειψη των περισσότερων οροτύπων, εξακολουθεί να υπάρχει ανησυχία για την εμφάνιση περιβαλλοντικών ή σιωπηλών κρουσμάτων, καθώς το 70–95% των λοιμώξεων είναι ασυμπτωματικές ή παρουσιάζουν ήπια συμπτώματα, όπως πυρετό, κακουχία, κεφαλαλγία και ναυτία, ενώ λιγότερο από 1% εξελίσσονται σε παραλυτική πολιομυελίτιδα, με την παράλυση να εμφανίζεται συνήθως 7–21 ημέρες μετά τη μόλυνση (Alleman et al., 2020; Duizer et al., 2023).

Το γονιδίωμα του πολιοϊού είναι μονόκλωνο RNA μήκους περίπου 7.500 νουκλεοτιδίων και κωδικοποιεί μια μεγάλη πολυπρωτεΐνη, η οποία υφίσταται πρωτεολυτικό διαχωρισμό σε δομικές (VP1–VP4) και μη δομικές πρωτεΐνες. Αυτές οι πρωτεΐνες είναι απαραίτητες για τη σύνθεση, συναρμολόγηση και τον πολλαπλασιασμό του ιού (Yang et al., 2023). Η γενετική αυτή οργάνωση αποτελεί τη βάση για την τυποποίηση των στελεχών μέσω μοριακών τεχνικών, όπως η αλληλούχιση της περιοχής VP1, η οποία χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση άγριων και εμβολιογενών στελεχών. Η ανθεκτικότητα του πολιοϊού σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, το pH και η παρουσία οργανικής ύλης, του επιτρέπει να παραμένει μολυσματικός στο περιβάλλον, ιδίως στα υγρά απόβλητα, για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενισχύοντας τη σημασία της περιβαλλοντικής επιτήρησης στην

παγκόσμια στρατηγική εξάλειψης της νόσου (Duizer et al., 2023; Kitakawa et al., 2023).

Η μετάδοση της πολιομυελίτιδας γίνεται κυρίως μέσω της κοπρανοστοματικής οδού και σχετίζεται στενά με τις συνθήκες υγιεινής και την ποιότητα του νερού. Η δευτερεύουσα οδός μετάδοσης είναι μέσω σταγονιδίων από τον φάρυγγα, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υψηλή συγκέντρωση παιδικού πληθυσμού. Η υψηλή μεταδοτικότητα του ιού, σε συνδυασμό με την ασυμπτωματική φύση των περισσότερων λοιμώξεων, περίπου 70%–95% είναι υποκλινικές, καθιστούν την επιδημιολογική επιτήρηση της πολιομυελίτιδας ιδιαίτερα δύσκολη (Alleman et al., 2020; Whitehouse et al., 2024). Η κλινική εικόνα της νόσου ποικίλει ανάλογα με την ανοσολογική κατάσταση του ασθενούς και το στέλεχος του ιού. Οι περισσότερες λοιμώξεις παραμένουν υποκλινικές ή εκδηλώνονται με ήπια συμπτώματα, όπως πυρετό, κεφαλαλγία, ναυτία ή μυαλγίες. Σε λιγότερο από 1% των περιπτώσεων, ο ιός εισέρχεται στο κεντρικό νευρικό σύστημα, προκαλώντας οξεία χαλαρή παράλυση, συνήθως ασύμμετρη, με τα κάτω άκρα να επηρεάζονται πιο συχνά (Luo et al., 2013; Seo et al., 2025) (ΕΙΚΟΝΑ 1). Το σύνδρομο μετα-πολιομυελίτιδας (post-polio syndrome) είναι μια μακροχρόνια επιπλοκή, εμφανιζόμενη χρόνια μετά την αρχική νόσηση, με προοδευτική μυϊκή αδυναμία και κόπωση (Li Hi Shing et al., 2019).



Εικόνα 1: Η πορεία του πολιοϊού στο ανθρώπινο σώμα, από την είσοδο του στόματος και τη μόλυνση των εντερικών κυττάρων, έως την εξάπλωση στο κεντρικό νευρικό σύστημα και την καταστροφή των κινητικών νευρώνων, οδηγώντας σε παράλυση (Jayche et al., 2024).

Η ιστορική πορεία της πολιομυελίτιδας είναι ιδιαίτερα ενδεικτική της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην ανθρώπινη εξέλιξη, την αστικοποίηση και τις προσπάθειες δημόσιας υγείας. Αρχαιολογικά και ιστορικά στοιχεία από την Αίγυπτο και την Ασία καταδεικνύουν την ύπαρξη περιπτώσεων από την αρχαιότητα. Οι πρώτες κλινικές περιγραφές της νόσου εμφανίζονται το 18ο και 19ο αιώνα, με κορύφωση την

αναγνώρισή της ως ξεχωριστή νοσολογική οντότητα από τους Jakob Heine και Karl Oskar Medin (Melnick, 1947). Η παγκόσμια ανησυχία κορυφώθηκε κατά τις δεκαετίες 1910–1950, όταν επαναλαμβανόμενες επιδημίες στις ΗΠΑ και την Ευρώπη προκάλεσαν ευρεία παράλυση και κοινωνικό πανικό, ειδικά ανάμεσα σε παιδιά (Trevelyan et al., 2005). Η επιδημία του 1916 στη Νέα Υόρκη, με πάνω από 27.000 κρούσματα και 6.000 θανάτους, αποτελεί σημείο αναφοράς για τη δημόσια υγεία (Trevelyan et al., 2005).

Η καθοριστική αλλαγή ήρθε με την ανάπτυξη και διάθεση των εμβολίων. Το 1955, ο Jonas Salk ανέπτυξε το αδρανοποιημένο εμβόλιο (IPV) και λίγα χρόνια αργότερα ο Albert Sabin παρουσίασε το εξασθενημένο από του στόματος εμβόλιο (OPV), τα οποία σε συνδυασμό αποτέλεσαν τον ακρογωνιαίο λίθο της παγκόσμιας στρατηγικής εξάλειψης της νόσου (Pattison, 2020). Το 1988, η ίδρυση της Global Polio Eradication Initiative (GPEI) από τον ΠΟΥ (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας), τη UNICEF και άλλους φορείς, σηματοδότησε τη συντονισμένη προσπάθεια εξάλειψης της πολιομυελίτιδας παγκοσμίως. Μέχρι το 2023, πάνω από 2,5 δισεκατομμύρια παιδιά είχαν εμβολιαστεί και τα κρούσματα είχαν μειωθεί κατά >99% σε σχέση με το 1988 (GPEI, 2023). Παρά ταύτα, ο άγριος πολιοϊός (WPV1) εξακολουθεί να κυκλοφορεί ενδημικά σε δύο χώρες, το Πακιστάν και το Αφγανιστάν, κυρίως λόγω κοινωνικών, πολιτικών και θρησκευτικών εμποδίων στον εμβολιασμό (Whitehouse et al., 2024;). Πέρα από τα στελέχη WPV1, ιδιαίτερη ανησυχία προκαλούν τα κυκλοφορούντα εμβολιογενή στελέχη τύπου 2 (cVDPV2), τα οποία έχουν ανασυνδυαστεί γενετικά, επαναποκτώντας νευροπαθογονικότητα (Klapsa et al., 2022; Seo et al., 2025). Αυτά τα στελέχη έχουν εντοπιστεί σε υγρά απόβλητα περιοχών όπου η εμβολιαστική κάλυψη είναι ανεπαρκής, όπως στο Λονδίνο, τη Νέα Υόρκη και πρόσφατα στον Καναδά, χωρίς αντίστοιχα καταγεγραμμένα κλινικά περιστατικά, γεγονός που υποδεικνύει σιωπηλή μετάδοση (Duizer et al., 2023; Seo et al., 2025).

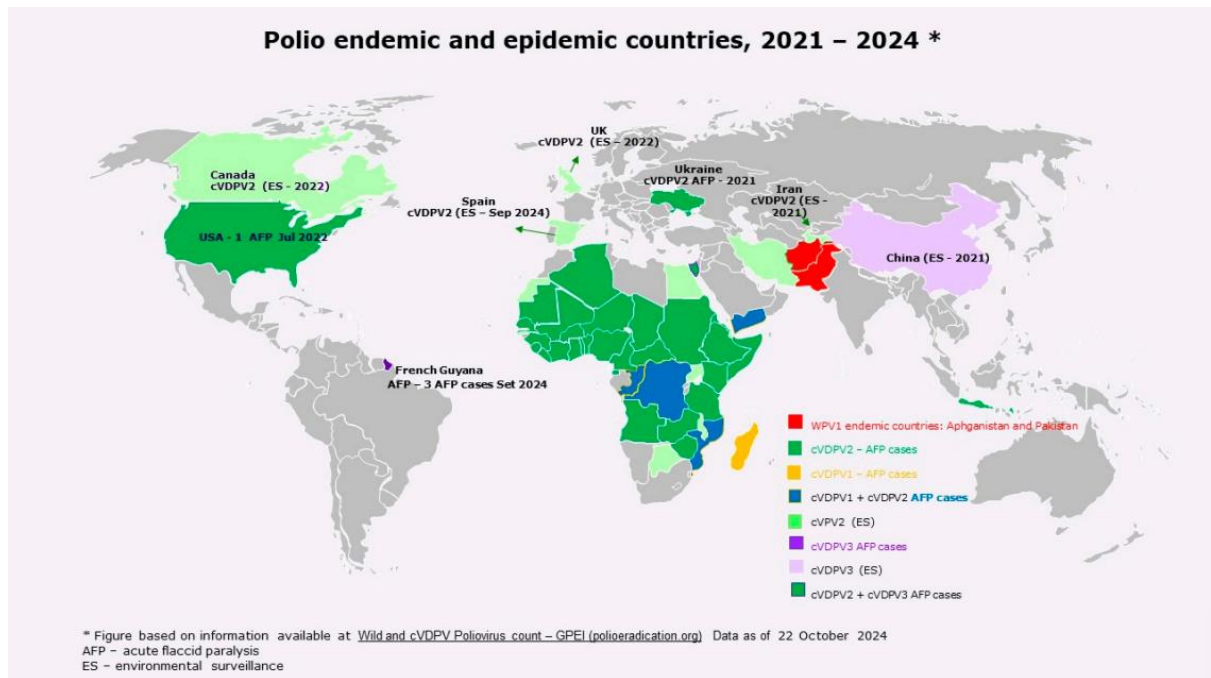
Η περιβαλλοντική επιτήρηση της πολιομυελίτιδας αναπτύχθηκε ως απαραίτητο εργαλείο συμπλήρωσης της επιτήρησης κρουσμάτων οξείας χαλαρής παράλυσης (AFP). Μέσω της ανάλυσης υγρών αποβλήτων, είναι δυνατή η ανίχνευση του πολιοϊού πριν εμφανιστούν κλινικά περιστατικά, επιτρέποντας την έγκαιρη παρέμβαση και τον περιορισμό της μετάδοσης (Klapsa et al., 2022; Child et al., 2023). Η τεχνολογία RT-PCR, οι πλατφόρμες NGS και οι νέες προσεγγίσεις με Nanopore sequencing επιτρέπουν σήμερα υψηλή ευαισθησία και εξειδίκευση, ακόμα και για την άμεση τυποποίηση του ιού (Girón-Guzmán et al., 2024; Farkas et al., 2025). Χαρακτηριστικά, στον Καναδά, το 2022, αναπτύχθηκε πιλοτικό πρόγραμμα ανίχνευσης πολιοϊού στα υγρά απόβλητα του Μόντρεαλ μετά από αναφορές εμφάνισης VDPV2 στη Νέα Υόρκη. Οι γενετικές αναλύσεις αποκάλυψαν κοινές μεταλλάξεις σε κρίσιμες περιοχές, όπως η VP1, που συνδέονται με επαναφορά νευροπαθογονικότητας (Seo et al., 2025). Αντίστοιχα, μελέτες στο Ηνωμένο Βασίλειο και στις Κάτω Χώρες έχουν καταδείξει ότι οι ανιχνεύσεις σε PEFs (Poliovirus Essential Facilities) εγκαταστάσεις μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για τη δυναμική της κυκλοφορίας (Duizer et al., 2023).

Εκτός από τις τεχνικές αλληλούχισης, εφαρμόζονται πρωτόκολλα εμπλουτισμού RNA, φίλτρα καθαρισμού και προτυποποιημένα συστήματα για την απομόνωση και ανάλυση των δειγμάτων, τα οποία καθίστανται όλο και πιο προσβάσιμα σε χώρες με περιορισμένους πόρους (Kitakawa et al., 2023; Girón-Guzmán et al., 2024). Η πρόοδος στη βιοπληροφορική και η ανάπτυξη εργαλείων όπως τα COJAC και Freyja έχουν διευκολύνει την παρακολούθηση πολλών γενετικών στελεχών εντός του ίδιου δείγματος. Τα εργαλεία βιοπληροφορικής Freyja και COJAC έχουν συμβάλει σημαντικά στην ανάλυση πολύπλοκων δειγμάτων όπως τα λύματα. Το Freyja επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση της αναλογίας διαφορετικών γενετικών στελεχών σε ένα δείγμα, ακόμη και όταν υπάρχουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, καθιστώντας το ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την παρακολούθηση μεταλλάξεων σε πραγματικό χρόνο. Το COJAC, από την άλλη πλευρά, εστιάζει στην ανίχνευση μεταλλάξεων που συμβαίνουν ταυτόχρονα (συνυπάρχουσες μεταλλάξεις) σε μικρές ακολουθίες (amplicons), αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματικό από τον Freyja στην ανάλυση πολύπλοκων και μικτών δειγμάτων (Karthikeyan et al., 2022). Καθώς η ανθρωπότητα πλησιάζει την τελική φάση εξάλειψης της πολιομυελίτιδας, η ενσωμάτωση του μοντέλου One Health που συνδυάζει τη δημόσια υγεία, την κτηνιατρική και την περιβαλλοντική επιστήμη καθίσταται καθοριστική. Η περιβαλλοντική επιτήρηση, μέσω της χρήσης εξελιγμένων τεχνολογιών, αναδεικνύεται σε βασικό εργαλείο παγκόσμιας προετοιμασίας για την αντιμετώπιση παλαιών και νέων απειλών.

1.2 ΕΠΙΔΗΜΙΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Η επιδημιολογία της πολιομυελίτιδας συνδέεται στενά με τις κοινωνικές, υγειονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες των πληθυσμών, καθώς και με τη γεωγραφική και χρονική κατανομή της κυκλοφορίας του ιού. Η πολιομυελίτιδα εμφανίζεται κυρίως σε περιοχές με χαμηλή εμβολιαστική κάλυψη, ανεπαρκείς υποδομές υγιεινής και δυσκολίες στην πρόσβαση στις υπηρεσίες υγείας (WHO, 2023). Ο πολιοϊός μεταδίδεται κυρίως μέσω της κοπρανοστοματικής οδού, κυρίως μέσω της κατάποσης νερού ή τροφής που έχει μολυνθεί με κόπρανα από μολυσμένο άτομο. Η δευτερεύουσα οδός μετάδοσης περιλαμβάνει τα εκκρίματα του φάρυγγα, μέσω σταγονιδίων. Η μετάδοση ευνοείται σε συνθήκες συνωστισμού και κακής υγιεινής, όπως καταυλισμοί, φυλακές ή υποβαθμισμένοι αστικοί πληθυσμοί (Kew et al., 2005; Duizer et al., 2023).

Τα τελευταία 4 χρόνια, ο αριθμός των κρουσμάτων AFP που προκαλούνται από το cVDPV2 μειώθηκε, αλλά εμφανίστηκαν νέες χώρες, ανεβάζοντας τον συνολικό αριθμό των χωρών όπου εντοπίστηκε cVDPV2 σε 51. Το 2024, τα στελέχη cVDPV2 εντοπίστηκαν αποκλειστικά μέσω περιβαλλοντικής επιτήρησης σε 13 χώρες (EIKONA 2).



Εικόνα 2: Παγκόσμιος χάρτης χωρών με ενδημική κυκλοφορία WPV1 και επιδημίες cVDPVs κατά την περίοδο 2021-2024 (Bricks et al., 2024).

Περίπου το 70%–95% των λοιμώξεων από πολιοϊό είναι ασυμπτωματικές, γεγονός που καθιστά τη διάγνωση και την παρακολούθηση της κυκλοφορίας του ιού ιδιαίτερα δύσκολη (Alleman et al., 2020). Υπάρχουν διάφορες μορφές εκδήλωσης της νόσου:

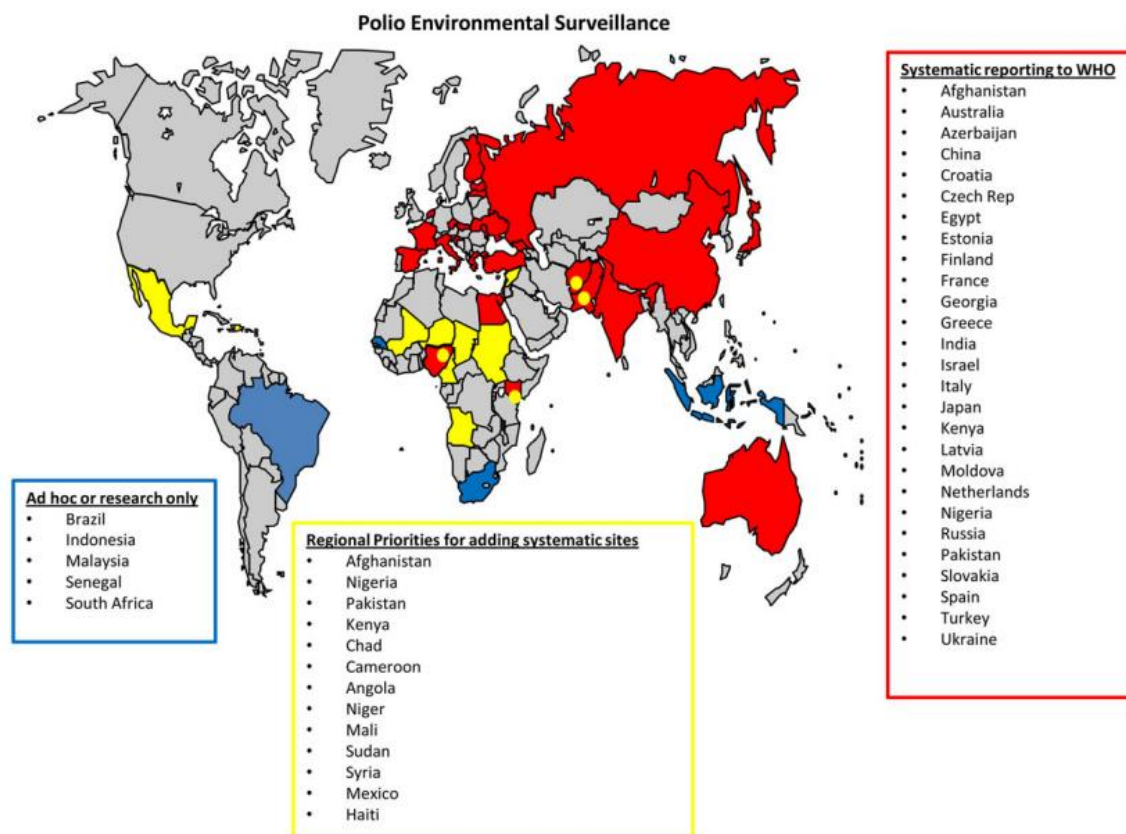
- Η ασυμπτωματική λοίμωξη, η οποία αφορά περίπου το 90% των περιπτώσεων και κατά την οποία ο ιός αναπαράγεται χωρίς να προκαλεί εμφανή συμπτώματα.
- Η ήπια μορφή, που περιλαμβάνει συμπτώματα τύπου γρίπης όπως πυρετό, κόπωση, πονόλαιμο και εμετούς.
- Η μη παραλυτική πολιομυελίτιδα, με συμπτώματα όπως αυχενική δυσκαμψία, κεφαλαλγία και μυϊκούς πόνους, τα οποία προσομοιάζουν με αυτά της ιογενούς μηνιγγίτιδας.
- Η παραλυτική πολιομυελίτιδα, που εμφανίζεται σε λιγότερο από 1% των λοιμώξεων, επηρεάζει το κεντρικό νευρικό σύστημα και προκαλεί μυϊκή αδυναμία ή παράλυση, συχνά με αιφνίδια και ασύμμετρη κατανομή (CDC, 2006).

Η κατανόηση της ποικιλομορφίας των κλινικών μορφών της νόσου είναι καίριας σημασίας για την επιδημιολογική παρακολούθηση και την έγκαιρη αναγνώριση περιστατικών που χρήζουν άμεσης παρέμβασης., γεγονός που καθιστά τη διάγνωση και την παρακολούθηση της κυκλοφορίας του ιού ιδιαίτερα δύσκολη (Alleman et al., 2020). Περίπου 4%–8% των περιπτώσεων εμφανίζουν ήπια συμπτώματα όπως πυρετό, κακουχία, κεφαλαλγία ή ναυτία. Σε λιγότερο από 1% των λοιμώξεων, ο ιός εισέρχεται στο κεντρικό νευρικό σύστημα, προκαλώντας οξεία χαλαρή παράλυση, με τον κίνδυνο μόνιμης αναπηρίας ή ακόμα και θανάτου (WHO, 2023). Η επίπτωση της νόσου

παρουσίαζε ιστορικά εποχικότητα, με αυξημένη εμφάνιση τους θερινούς μήνες σε εύκρατα κλίματα και όλο το έτος σε τροπικές ζώνες. Παράγοντες όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και η παρουσία οργανικής ύλης στο περιβάλλον επηρεάζουν την επιβίωση και τη μετάδοση του ιού (Melnick, 1947; Kitakawa et al., 2023).

Η παγκόσμια εξάλειψη της πολιομυελίτιδας αποτελεί διαρκή στόχο του ΠΟΥ. Από την έναρξη της Παγκόσμιας Πρωτοβουλίας για την Εξάλειψη της Πολιομυελίτιδας (GPEI) το 1988, τα κρούσματα μειώθηκαν κατά περισσότερο από 99%, από περίπου 350.000 ετησίως σε μόλις 6 επιβεβαιωμένα κρούσματα WPV1 το 2021 (WHO, 2023). Μέχρι σήμερα, πέντε από τις έξι περιοχές του ΠΟΥ έχουν ανακηρυχθεί απαλλαγμένες από την πολιομυελίτιδα, με την Ανατολική Μεσόγειο να αποτελεί τη μόνη εξαίρεση λόγω ενδημικής κυκλοφορίας σε Πακιστάν και Αφγανιστάν (ECDC, 2024).

Η γεωγραφική κατανομή του ιού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον (ΕΙΚΟΝΑ 3). Η νόσος εμφανίζεται σε όλες τις ηλικιακές ομάδες, όμως τα παιδιά είναι γενικά πιο ευάλωτα, καθώς οι ενήλικες έχουν αναπτύξει επίκτητη ανοσία λόγω προηγούμενης έκθεσης. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου οι συνθήκες διαβίωσης επιτρέπουν ευρεία κυκλοφορία του ιού, η πολιομυελίτιδα συνεχίζει να πλήττει κυρίως τον παιδικό πληθυσμό. Αντίθετα, σε ανεπτυγμένες χώρες πριν από την εισαγωγή των εμβολίων, η νόσος είχε μετακινηθεί σε μεγαλύτερες ηλικίες, με το 25% των κρουσμάτων να αφορά άτομα άνω των 15 ετών (Nathanson and Kew, 2010).



Εικόνα 3: Παγκόσμιος χάρτης χωρών που έχουν εφαρμόσει περιβαλλοντική επιτήρηση ή προγράμματα δειγματοληψίας για πολιοϊό (Asghar et al., 2014).

Σε τροπικές περιοχές με κακή υγιεινή και αποχέτευση, σχεδόν όλα τα παιδιά μολύνονται από πολιοϊό σε μικρή ηλικία, οδηγώντας στην ανάπτυξη φυσικής ανοσίας, με αποτέλεσμα η νόσος να διατηρείται σε χαμηλό επιπολασμό στον πληθυσμό. Στις εύκρατες ζώνες, η κυκλοφορία του ιού εξασθενεί εποχικά και ακολουθείται από περιόδους ελάττωσης της ανοσίας του πληθυσμού. Όταν συγκεντρωθεί επαρκής αριθμός ευπαθών ατόμων, ενδέχεται να ξεσπάσουν επιδημίες. Σε αυτές τις περιοχές, ο ζεστός καιρός φαίνεται να διευκολύνει τη μετάδοση του ιού μέσω αυξημένων επαφών, ευαλωτότητας του ξενιστή και εξωανθρώπινων πηγών μόλυνσης. Εντός της ίδιας οικογένειας, ο ιός διαδίδεται ταχύτατα, και όταν διαγνωστεί το πρώτο περιστατικό, συνήθως όλοι οι ευάλωτοι έχουν ήδη εκτεθεί (Alleman et al., 2020; WHO, 2023).

Ενδεικτικά, στο Ηνωμένο Βασίλειο το τελευταίο καταγεγραμμένο περιστατικό φυσικής πολιομυελίτιδας καταγράφηκε το 1984. Στην περίοδο 1985–2002, αναφέρθηκαν 40 περιστατικά παραλυτικής μορφής, εκ των οποίων τα 30 σχετιζόνταν με το εμβόλιο OPV, έξι ήταν εισαγόμενα και σε πέντε περιπτώσεις η πηγή παρέμεινε άγνωστη. Ο άγριος ιός δεν απομονώθηκε (Avellón, 2008). Αντίστοιχα, το 2000, στην Ισπανία καταγράφηκε επιδημικό ξέσπασμα με παραλυτική πολιομυελίτιδα που σχετιζόταν με ανασυνδυασμένο στέλεχος του εμβολίου και ενός άγνωστου ιού, τονίζοντας τον δυνητικό κίνδυνο των cVDPVs ακόμη και σε περιοχές που θεωρούνταν

απαλλαγμένες από την ασθένεια. Οι περισσότερες περιπτώσεις WPV1 εντοπίζονται σήμερα στο Πακιστάν και στο Αφγανιστάν, με μεμονωμένες ανιχνεύσεις σε υγρά απόβλητα και σε μη ενδημικές χώρες, όπως οι ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και ο Καναδάς, όπου εντοπίστηκαν στελέχη cVDPV2 σε δείγματα περιβαλλοντικής επιτήρησης (Duizer et al., 2023; Whitehouse et al., 2024).

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, η επιδημιολογική επιτήρηση καταγράφει περιστασιακές εξάρσεις σε περιοχές με ευάλωτους πληθυσμούς και μετακινούμενες ομάδες, όπως πρόσφυγες, πληθυσμοί χωρίς σταθερή κατοικία και άτομα που διαβιούν σε ακραίες συνθήκες φτώχειας. Σε αυτές τις ομάδες, η έλλειψη βασικών υπηρεσιών υγείας, η κοινωνική απομόνωση και η πολιτική αστάθεια μπορούν να οδηγήσουν σε καθυστέρηση της ανίχνευσης και της παρέμβασης (WHO, 2023; Njile et al., 2024). Η ανίχνευση πολιοϊών μέσω περιβαλλοντικής επιτήρησης έχει αυξήσει την ευαισθησία των συστημάτων δημόσιας υγείας και την ικανότητά τους να προλαμβάνουν την εμφάνιση νέων επιδημιών. Η παρουσία πολιοϊών σε υγρά απόβλητα περιοχών που θεωρούνται απαλλαγμένες από την ασθένεια αποτελεί σημαντικό προειδοποιητικό σημάδι. Έχει παρατηρηθεί ότι η ανίχνευση μέσω υγρών αποβλήτων μπορεί να προηγηθεί της εμφάνισης κλινικών κρουσμάτων κατά αρκετές εβδομάδες, δίνοντας πολύτιμο χρόνο για την εφαρμογή παρεμβάσεων (Asghar et al., 2014).

Η μετάδοση της πολιομυελίτιδας ενισχύεται σε περιβάλλοντα με περιορισμένη πρόσβαση σε καθαρό νερό, ανεπαρκείς υποδομές αποχέτευσης και κακή εφαρμογή βασικών μέτρων υγιεινής. Η διαβίωση σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, ειδικά σε «παραγκουπόλεις», αυξάνει τη μεταδοτικότητα μέσω άμεσης επαφής με μολυσμένα κόπρανα ή επιφάνειες. Σε χώρες με θερμό και υγρό κλίμα, οι συνθήκες αυτές συμβάλλουν επιπλέον στη διατήρηση του ιού στο περιβάλλον για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (Kew et al., 2005; Warraich et al., 2009). Η συμπεριφορά του ιού στο ανθρώπινο σώμα είναι επίσης σημαντική για την κατανόηση της μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, ο ιός της πολιομυελίτιδας εισέρχεται μέσω του στοματοφάρυγγα και πολλαπλασιάζεται τοπικά στις αμυγδαλές, στους λεμφαδένες, καθώς και στις πλάκες Peyer και στο επιθήλιο του λεπτού εντέρου (WHO, 2023). Η περίοδος επώασης κυμαίνεται συνήθως από 7 έως 14 ημέρες (ΕΟΔΥ, 2021), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις έχει προταθεί ότι ο ιός εισέρχεται στη συστηματική κυκλοφορία και επανεισέρχεται δευτερογενώς στις αμυγδαλές.

Ο πολιοϊός μπορεί να ανιχνευθεί στις φαρυγγικές εκκρίσεις περίπου 36 ώρες μετά την έκθεση και στα κόπρανα εντός 72 ωρών. Παραμένει στον φάρυγγα για περίπου μία εβδομάδα και στα κόπρανα για 3–6 εβδομάδες, αν και σε ανοσοκατεσταλμένα άτομα μπορεί να αποβάλλεται για ακόμη μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (ΕΟΔΥ, 2021). Η μετάδοση είναι πιο ενεργή τις ημέρες πριν και μετά την έναρξη των συμπτωμάτων, οι οποίες μπορεί να είναι ήπιες ή και εντελώς ασυμπτωματικές. Σε αυτό το πλαίσιο, παρατηρούνται αυτοπεριοριζόμενα επεισόδια γαστρεντερίτιδας, λοίμωξης του ανώτερου αναπνευστικού και συμπτωματολογία παρόμοια με της γρίπης. Μετά τη μόλυνση, ο πολιοϊός πολλαπλασιάζεται στον φάρυγγα και στο έντερο. Η απέκκριση του ιού στα κόπρανα μπορεί να διαρκέσει αρκετές εβδομάδες, ακόμα και σε άτομα

χωρίς συμπτώματα. Επιπλέον, αν και σπάνια, ο ιός μπορεί να μεταδοθεί και μέσω αναπνευστικών εκκρίσεων, ιδίως στα αρχικά στάδια της λοίμωξης, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη για προληπτικά μέτρα σε περιβάλλοντα υψηλής επικινδυνότητας, όπως σχολεία και παιδικοί σταθμοί (Alleman et al., 2020; WHO, 2023).

Η πορεία της μετάδοσης επηρεάζεται επίσης από την κινητικότητα των πληθυσμών. Ο τουρισμός, η μετανάστευση και οι ανθρωπιστικές κρίσεις συμβάλλουν στη μεταφορά του ιού από περιοχές ενδημίας σε περιοχές χωρίς ενεργή κυκλοφορία, δημιουργώντας νέες εστίες κινδύνου. Γι' αυτό και ο εμβολιασμός ταξιδιωτών που προέρχονται ή κατευθύνονται σε ενδημικές περιοχές αποτελεί βασικό στοιχείο της στρατηγικής πρόληψης (ECDC, 2024; Whitehouse et al., 2024). Η κυτταροπαθογόνος δράση του πολιοϊού είναι ο κύριος μηχανισμός μέσω του οποίου προκαλείται η νευρολογική βλάβη. Ο ιός επιτίθεται κυρίως στα νευρικά κύτταρα του πρόσθιου κέρατου του νωτιαίου μυελού, προκαλώντας την εκτεταμένη καταστροφή των κατώτερων κινητικών νευρώνων, γεγονός που οδηγεί σε μυϊκή αδυναμία και παράλυση των άκρων. Σε σοβαρότερες περιπτώσεις, η λοίμωξη μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες περιοχές του νευρικού συστήματος, όπως το οπίσθιο κέρατο, ο θάλαμος και ο υποθάλαμος, καθώς και το εγκεφαλικό στέλεχος, οδηγώντας σε βολβική μορφή πολιομυελίτιδας, η οποία μπορεί να είναι θανατηφόρα (Melnick, 1997).

Η φλεγμονώδης απάντηση περιλαμβάνει διήθηση με πλασματοκύτταρα, πολυμορφοπύρρηνα ουδετερόφιλα και μικρογλοιακά κύτταρα, τα οποία συμβάλλουν στην καταστροφή των νευρικών ιστών. Οι προσβεβλημένοι νευρώνες υφίστανται εκφυλιστικές αλλοιώσεις και φαγοκυττάρωση από τα μακροφάγα, με συνέπεια την εκτεταμένη μυϊκή ατροφία και τη χαρακτηριστική εικόνα της χαλαρής παράλυσης. Στις περιπτώσεις όπου επηρεάζεται το αναπνευστικό κέντρο, ο θάνατος μπορεί να επέλθει από αναπνευστική ανεπάρκεια. Η πολιομυελίτιδα δεν αποτελεί απλώς μια οξεία λοίμωξη με παροδικά συμπτώματα. Ακόμη και δεκαετίες μετά την αρχική παραλυτική φάση, ένα σημαντικό ποσοστό επιζώντων εμφανίζει το σύνδρομο μεταπολιομυελίτιδας (post-polio syndrome - PPS), το οποίο χαρακτηρίζεται από προοδευτική μυϊκή ατροφία, κόπωση και επιδείνωση της κινητικής λειτουργίας (Duizer et al., 2023). Η αιτιολογία του PPS δεν έχει πλήρως αποσαφηνιστεί. Μία υπόθεση υποδεικνύει ότι σχετίζεται με τη συνεχιζόμενη φθορά των κινητικών νευρώνων που επιβίωσαν από την αρχική λοίμωξη και επιφορτίστηκαν με αυξημένο φορτίο λόγω αντιρροπιστικής λειτουργίας για τους κατεστραμμένους νευρώνες.

Άλλη θεωρία εστιάζει σε ανοσολογικούς μηχανισμούς και ειδικά στην παρουσία κυτοκινών – πρωτεϊνών με ρυθμιστική δράση στο ανοσοποιητικό σύστημα – στον εγκέφαλο και το νωτιαίο μυελό, οι οποίες πιθανώς παραμένουν ενεργές λόγω επίμονης παρουσίας του ιού ή παρατεταμένης φλεγμονώδους απάντησης (Xiao and Zhang, 2023; Hellmér et al., 2014). Οι κυτοκίνες, αναλόγως τον τύπο και της συγκέντρωσής τους, μπορούν είτε να ενεργοποιούν είτε να καταστέλλουν το ανοσοποιητικό σύστημα και έχουν μελετηθεί ως πιθανοί παράγοντες σε νευροεκφυλιστικές και αυτοάνοσες νόσους. Το γεγονός ότι το εμβόλιο OPV βασίζεται σε εξασθενημένους ζωντανούς ιούς

συνεπάγεται τον δυνητικό κίνδυνο επανεμφάνισης πολιομυελίτιδας μέσω ανασυνδυασμένων στελεχών. Η παραλυτική μορφή της νόσου που σχετίζεται με το εμβόλιο (vaccine-associated paralytic poliomyelitis - VAPP), καθώς και η κυκλοφορία των εμβολιογενών στελεχών (cVDPV), καθιστούν σαφές ότι η εκρίζωση της πολιομυελίτιδας προϋποθέτει την οριστική απόσυρση του OPV και την αντικατάστασή του από το αδρανοποιημένο εμβόλιο (IPV). Οι περιοχές που έχουν ήδη απαλλαγεί από τον άγριο ιό παραμένουν ευάλωτες σε επανεισαγωγή μέσω cVDPV από περιοχές όπου το OPV εξακολουθεί να χρησιμοποιείται (CDC, 2013).

Αναγνωρίζοντας τις διαρκείς προκλήσεις, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας κήρυξε το 2012 την εξάλειψη της πολιομυελίτιδας ως παγκόσμια προγραμματική έκτακτη ανάγκη. Το πρόγραμμα Stop Transmission of Polio (STOP) ξεκίνησε με στόχο την ενίσχυση της επιδημιολογικής επιτήρησης και την υποστήριξη των εκστρατειών μαζικού εμβολιασμού, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλού κινδύνου. Παρά τις προσπάθειες, η γεωμορφολογία, τα προβλήματα προσβασιμότητας, η απουσία υποδομών υγιεινής, η πολιτική αστάθεια και η διστακτικότητα ορισμένων θρησκευτικών ή τοπικών κοινοτήτων συνεχίζουν να αποτελούν σοβαρά εμπόδια στην επίτευξη του τελικού στόχου της παγκόσμιας εκρίζωσης (Warraich, 2009).

1.3 ΕΜΒΟΛΙΑΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ

Η πρόληψη της πολιομυελίτιδας στηρίζεται σχεδόν αποκλειστικά στον εμβολιασμό, καθώς μέχρι σήμερα δεν υπάρχει ειδική θεραπεία κατά του ιού (CDC, 2023). Η χρήση αποτελεσματικών εμβολίων και η καθολική εφαρμογή εμβολιαστικών προγραμμάτων έχει οδηγήσει σε εντυπωσιακή μείωση των παγκόσμιων κρουσμάτων από την έναρξη της Παγκόσμιας Πρωτοβουλίας για την Εξάλειψη της Πολιομυελίτιδας (Global Polio Eradication Initiative - GPEI) το 1988 (Willyard, 2014).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι εμβολίων κατά της πολιομυελίτιδας: το αδρανοποιημένο εμβόλιο (IPV – Salk) και το από του στόματος εξασθενημένο εμβόλιο (OPV – Sabin). Το IPV χορηγείται ενδομυϊκά και περιέχει ανενεργό ιό, προσφέροντας προστασία έναντι της παραλυτικής μορφής της νόσου χωρίς τον κίνδυνο πρόκλησης εμβολιογενούς πολιομυελίτιδας (CDC, 2023). Το OPV περιέχει ζωντανούς εξασθενημένους ιούς και χορηγείται από το στόμα. Παρότι είναι πιο εύκολο στη χορήγηση και προκαλεί τοπική ανοσία στο έντερο, μπορεί σε σπάνιες περιπτώσεις να προκαλέσει παραλυτική μορφή της νόσου (VAPP) ή την εμφάνιση κυκλοφορούντων εμβολιοπροερχόμενων στελεχών (cVDPV) (Kew et al., 2005). Η επιλογή μεταξύ OPV και IPV εξαρτάται από την επιδημιολογική κατάσταση της κάθε χώρας. Σε ενδημικές ή υψηλού κινδύνου περιοχές, το OPV χρησιμοποιείται ευρέως για την επίτευξη υψηλής πληθυσμιακής ανοσίας και τη διακοπή της μετάδοσης (WHO, 2023). Αντίθετα, σε χώρες που έχουν εξαλείψει την πολιομυελίτιδα, το IPV αποτελεί προτιμώμενη επιλογή, καθώς μειώνει τον κίνδυνο εμβολιογενούς πολιομυελίτιδας και αποτρέπει την αναζωπύρωση (GPEI, 2024).

Για την αντιμετώπιση των cVDPV, η WHO προωθεί τη χρήση του νέου, πιο γενετικά σταθερού εμβολίου nOPV2, το οποίο παρουσιάζει μειωμένο κίνδυνο ανασυνδυασμού και εξελικτικής μετατροπής σε παθογόνα στελέχη (GPEI, 2024). Το nOPV2 έχει ήδη χορηγηθεί σε εκατομμύρια παιδιά σε χώρες όπως το Πακιστάν, το Τσαντ και η Νιγηρία, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα ως προς την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα (WHO, 2025). Η εμβολιαστική στρατηγική της GPEI βασίζεται σε τέσσερις πυλώνες:

1. ισχυρή ρουτίνα εμβολιασμού,
2. μαζικές εκστρατείες ανοσοποίησης σε περιοχές κινδύνου,
3. επιδημιολογική και περιβαλλοντική επιτήρηση και
4. ταχεία ανταπόκριση σε νέα κρούσματα (GPEI, 2024).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ενίσχυση της ρουτίνας εμβολιασμού μέσω εθνικών συστημάτων πρωτοβάθμιας φροντίδας υγείας, ώστε να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη διατήρηση της ανοσίας του πληθυσμού (Alleman et al., 2020). Η διάγνωση της λοίμωξης στηρίζεται κυρίως στην απομόνωση του ιού από δείγματα κοπράνων. Ο πολιοϊός απεκκρίνεται από το έντερο για αρκετές εβδομάδες, με την υψηλότερη πιθανότητα απομόνωσης στις δύο πρώτες εβδομάδες. Για διαγνωστικούς σκοπούς, απαιτούνται δύο δείγματα κοπράνων με διαφορά τουλάχιστον 24 ωρών εντός των πρώτων 14 ημερών από την έναρξη των συμπτωμάτων (Alleman et al., 2020). Η αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης (PCR) αποτελεί βασική μοριακή μέθοδο για την ταυτοποίηση του ιού (CDC 2024).

Εκτός από τον εμβολιασμό, η διακοπή της μετάδοσης απαιτεί επενδύσεις σε υποδομές υγιεινής, καθαρού νερού και αποχέτευσης. Οι περιοχές με ελλείψεις σε αυτά τα συστήματα εμφανίζουν αυξημένη επίπτωση, καθώς η μετάδοση μέσω του νερού και της κοπρανοστοματικής οδού διευκολύνεται (WHO, 2023; Njile et al., 2024). Οι πλημμύρες, οι καταιγίδες και οι φυσικές καταστροφές, όπως αυτές που σημειώθηκαν στο Πακιστάν το 2022 και στη Μπαγκλαντές το 2021, έχουν συνδεθεί με αυξημένη ανίχνευση πολιοϊού στα υγρά απόβλητα, λόγω της διασποράς των ρύπων στο περιβάλλον (WHO, 2025; 2023). Η περιβαλλοντική επιτήρηση μέσω RT-PCR αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την ανίχνευση ιικού RNA πριν την εμφάνιση κλινικών κρουσμάτων, επιτρέποντας έγκαιρη δημόσια υγειονομική απόκριση (Asghar et al., 2014).

Η μαζική εφαρμογή των εμβολιαστικών προγραμμάτων δεν στερείται προκλήσεων. Η κοινωνική καχυποψία έναντι των εμβολίων, η παραπληροφόρηση, οι συγκρούσεις και οι μετακινήσεις πληθυσμών περιορίζουν την πρόσβαση σε φροντίδα υγείας και εντείνουν τα προβλήματα εμβολιαστικής κάλυψης. Ορισμένες κοινότητες θεωρούν τον εμβολιασμό πολιτικό εργαλείο ή συνδέουν τα εμβόλια με στείρωση ή ασθένειες (Warraich, 2009). Οι στρατηγικές της GPEI περιλαμβάνουν την προσέγγιση αυτών των πληθυσμών μέσω τοπικών ηγετών, προγραμμάτων εκπαίδευσης και κινητών μονάδων εμβολιασμού (Duizer et al., 2023).

Η πρόοδος στην εκρίζωση της πολιομυελίτιδας είναι εντυπωσιακή. Ωστόσο, η μετάδοση παραμένει ενεργή σε περιοχές όπως το Πακιστάν και το Αφγανιστάν, ενώ εμφάνιση cVDPV σε περιοχές χωρίς πρόσφατα περιστατικά υπενθυμίζει την ανάγκη για διατήρηση υψηλής εμβολιαστικής κάλυψης παγκοσμίως (Whitehouse et al., 2024). Η στρατηγική GPEI 2022–2026 επικεντρώνεται σε καινοτομία, συνεργασία και διαφάνεια, με στόχο την εξάλειψη όλων των μορφών πολιομυελίτιδας έως το 2026 (GPEI, 2024). Συνοψίζοντας, η στρατηγική εκρίζωσης της πολιομυελίτιδας βασίζεται σε ένα πολυδιάστατο μοντέλο: καθολική εμβολιαστική κάλυψη με ασφαλή και σταθερά εμβόλια, ισχυρή περιβαλλοντική και επιδημιολογική επιτήρηση, αποτελεσματική διαγνωστική ικανότητα, επενδύσεις σε υποδομές και στοχευμένες επικοινωνιακές παρεμβάσεις. Η επιτυχία εξαρτάται από τη διατήρηση της πολιτικής δέσμευσης, την ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας και την κοινωνική αποδοχή.

1.4 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ

Η περιβαλλοντική επιτήρηση (Environmental Surveillance – ES) της πολιομυελίτιδας αποτελεί έναν από τους βασικότερους πυλώνες των σύγχρονων στρατηγικών Δημόσιας Υγείας για τον εντοπισμό και την έγκαιρη παρέμβαση σε περιπτώσεις κυκλοφορίας του ιού σε πληθυσμούς. Σε αντίθεση με την επιτήρηση οξείας χαλαρής παράλυσης (AFP – Acute Flaccid Paralysis), η οποία βασίζεται στην αναφορά κλινικών περιστατικών, η ES επιτρέπει την ανίχνευση του πολιοϊού ακόμη και σε απουσία συμπτωμάτων, καλύπτοντας έτσι το τεράστιο ποσοστό ασυμπτωματικής λοίμωξης που εκτιμάται ότι υπερβαίνει το 90% των περιπτώσεων (WHO, 2023; Asghar et al., 2014).

Η βασική αρχή της περιβαλλοντικής επιτήρησης συνίσταται στη συστηματική συλλογή και ανάλυση δειγμάτων υγρών αποβλήτων με σκοπό τον εντοπισμό RNA πολιοϊών ή άλλων εντεροϊών μέσω τεχνικών μοριακής βιολογίας όπως η RT-PCR, ενώ η αλληλούχιση τμημάτων του γονιδιώματος (ιδίως της περιοχής VP1) επιτρέπει την ταξινόμηση και την παρακολούθηση της εξελικτικής πορείας των κυκλοφορούντων στελεχών (Marcet et al., 2025; Castro et al., 2024). Η ES δεν απαιτεί την ύπαρξη κλινικού περιστατικού και γι' αυτό λειτουργεί ως «πρώιμο σύστημα συναγερμού», αποκαλύπτοντας περιπτώσεις «σιωπηλής μετάδοσης» (silent transmission) και επιτρέποντας την έγκαιρη κινητοποίηση των υγειονομικών αρχών. Σε πολλές περιπτώσεις, η ανίχνευση του ιού σε υγρά απόβλητα προηγήθηκε κατά εβδομάδες ή και μήνες της καταγραφής παραλυτικών περιστατικών, όπως συνέβη στην Ολλανδία το 2022 (Kyriakopoulou et al., 2012; Duizer et al., 2023). Η στρατηγική αυτή έχει ήδη αποδειχθεί καθοριστική σε αρκετές χώρες. Στο Ισραήλ, η περιβαλλοντική επιτήρηση εντόπισε επαναλαμβανόμενα περιστατικά WPV1 στα υγρά απόβλητα, χωρίς ταυτόχρονη καταγραφή κλινικών περιστατικών. Στη Φινλανδία και την Ινδία, η ES αποτέλεσε μέσο παρακολούθησης του επιπέδου της εμβολιαστικής κάλυψης και της υγειονομικής ασφάλειας, ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο η εμφάνιση cVDPV2 το 2022 ανιχνεύτηκε μέσω υγρών αποβλήτων στο Λονδίνο, κινητοποιώντας μαζική εκστρατεία εμβολιασμού σε παιδιά (Whitehouse et al., 2024; Hovi et al., 2012).

Η περιβαλλοντική επιτήρηση δεν αποτελεί απλώς εναλλακτική προσέγγιση, αλλά ένα εργαλείο με ξεχωριστή προστιθέμενη αξία, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με αδύναμα συστήματα καταγραφής AFP ή σε περιοχές με υψηλή κινητικότητα πληθυσμών, όπως προσφυγικοί καταυλισμοί. Επίσης, η τεχνική αυτή αποδίδει ιδιαίτερα καλά σε πολυσύχναστα αστικά κέντρα, όπου η υψηλή πυκνότητα πληθυσμού αυξάνει τις πιθανότητες ανίχνευσης σε υγρά απόβλητα, επιτρέποντας έτσι τη γεωγραφική χαρτογράφηση της κυκλοφορίας του ιού (Toro et al., 2024). Το πλαίσιο εφαρμογής της ES έχει διευρυνθεί σημαντικά μετά την πανδημία COVID-19, όπου η παρακολούθηση του SARS-CoV-2 σε υγρά απόβλητα προσέφερε πολύτιμα διδάγματα για τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων ως δείκτες επιδημικής δραστηριότητας. Ο ΠΟΥ και το GPEI πλέον ενσωματώνουν ρητά την περιβαλλοντική επιτήρηση στο στρατηγικό σχέδιο 2022–2026, όχι μόνο για την εξάλειψη του πολιοιού αλλά και για την ενίσχυση της ετοιμότητας έναντι νέων απειλών Δημόσιας Υγείας (WHO, 2023; GPEI, 2024).

Σε τεχνικό επίπεδο, η αποτελεσματικότητα της ES εξαρτάται από παράγοντες όπως η επιλογή σημείων δειγματοληψίας, η συχνότητα συλλογής, οι τεχνικές συγκέντρωσης και καθαρισμού του δείγματος, και φυσικά η ευαισθησία των εργαστηριακών μεθόδων. Οι τεχνικές περιλαμβάνουν σήμερα τη χρήση RT-qPCR, nested PCR, direct molecular detection χωρίς απομόνωση του ιού, και σε πολλές περιπτώσεις επακόλουθη αλληλούχιση επόμενης γενιάς (NGS) για την αναγνώριση υποτύπων, ανασυνδυασμών και μεταλλάξεων (Marcet et al., 2025; Luo et al., 2013). Επιπλέον, η εφαρμογή γεωχωρικών εργαλείων επιτρέπει τη σύνδεση των αποτελεσμάτων της ES με δημογραφικά δεδομένα, για στοχευμένες παρεμβάσεις. Η ενσωμάτωση των δεδομένων ES με εκείνα της AFP surveillance ενισχύει τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων. Ο ΠΟΥ προτείνει ρητά την παράλληλη χρήση των δύο συστημάτων ως αλληλοσυμπληρούμενων, καθώς η ES εντοπίζει κυκλοφορία του ιού πριν ή χωρίς εκδήλωση παραλυτικών περιστατικών, ενώ η AFP τεκμηριώνει τις επιδημιολογικά σημαντικές περιπτώσεις. Η ES έχει ιδιαίτερη αξία σε περιοχές με ελλιπή ιατρική κάλυψη, όπου τα περιστατικά AFP ενδέχεται να μην καταγράφονται εγκαίρως ή καθόλου (WHO, 2023).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της περιβαλλοντικής επιτήρησης είναι ότι επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης των μαζικών εμβολιαστικών παρεμβάσεων. Η μείωση του ιικού φορτίου στα υγρά απόβλητα μετά από εκστρατείες χορήγησης OPV ή nOPV2 αποτελεί ισχυρό δείκτη αποτελεσματικότητας, ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή μη κλινικών περιστατικών (GPEI, 2024). Ωστόσο, η περιβαλλοντική επιτήρηση δεν στερείται προκλήσεων. Οι περιοχές χωρίς αποχετευτικό δίκτυο, όπως αγροτικές κοινότητες ή άτυποι οικισμοί, απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις δειγματοληψίας, όπως πηγάδια, βόθρους ή προσωρινές εγκαταστάσεις αποχέτευσης. Επίσης, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι συχνά δύσκολη, καθώς δεν υπάρχει άμεση αναλογία μεταξύ συγκέντρωσης RNA και αριθμού μολυσμένων ατόμων. Ειδικά σε περιβάλλοντα όπου επικρατούν πολλοί εντεροϊοί, η διακριτική ικανότητα των μεθόδων πρέπει να είναι υψηλή για να αποφεύγονται ψευδώς θετικά αποτελέσματα (WHO, 2003).

Συνολικά, η σημασία της περιβαλλοντικής επιτήρησης ενισχύεται συνεχώς, όχι μόνο ως εργαλείο για την εκρίζωση της πολιομυελίτιδας αλλά και ως πλατφόρμα για την προετοιμασία και ανταπόκριση σε μελλοντικές υγειονομικές κρίσεις. Η επένδυση σε τεχνολογική αναβάθμιση, η ενίσχυση της διατομεακής συνεργασίας και η συνεχής εκπαίδευση των επαγγελματιών υγείας και τεχνικών αποτελούν βασικά στοιχεία για την επιτυχία της. Η εμπειρία από δεκάδες χώρες δείχνει ότι η ES, όταν συνδυάζεται με ενεργή πολιτική δέσμευση, κοινωνική αποδοχή και επιστημονική επάρκεια, μπορεί να αποτελέσει τον ακρογωνιαίο λίθο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο όχι μόνο της πολιομυελίτιδας, αλλά και ενός ευρύτερου φάσματος απειλών Δημόσιας Υγείας.

2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ ΠΟΛΙΟΙΩΝ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η περιβαλλοντική επιτήρηση της πολιομυελίτιδας μέσω υγρών αποβλήτων αποτελεί βασικό εργαλείο για τον έγκαιρο εντοπισμό κυκλοφορίας του ιού, ανεξάρτητα από την εκδήλωση κλινικών συμπτωμάτων στον πληθυσμό. Η τεχνική αυτή συμπληρώνει τη συμβατική επιτήρηση βασισμένη σε περιπτώσεις οξείας χαλαρής παράλυσης (AFP), παρέχοντας πληροφορίες για την παρουσία πολιοϊών και άλλων εντεροϊών σε κοινότητες, ακόμη και σε περιοχές με υψηλή εμβολιαστική κάλυψη ή χωρίς αναφερόμενα περιστατικά (Harvala et al., 2025). Η διαδικασία της δειγματοληψίας αποτελεί καθοριστικό στάδιο για την αξιοπιστία της επιτήρησης και περιλαμβάνει διάφορες προσεγγίσεις, ανάλογα με τη στόχευση και τις υποδομές. Τα δύο κύρια είδη δειγμάτων είναι τα στιγμιαία (grab samples), τα οποία συλλέγονται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, και τα σύνθετα (composite samples), τα οποία αποτελούνται από συνεχείς ή περιοδικές λήψεις σε χρονικό διάστημα, προσφέροντας αντιπροσωπευτικότερο δείγμα για την υπό μελέτη περίοδο (Kmush et al., 2022).

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το είδος του πληθυσμού, τη συχνότητα εμφάνισης του ιού, τη γεωγραφική θέση και τις δυνατότητες ανάλυσης. Η συλλογή σύνθετων δειγμάτων θεωρείται πιο κατάλληλη για συνεχή παρακολούθηση σε αστικά κέντρα, όπου η ροή των υγρών αποβλήτων παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή σε απομακρυσμένες περιοχές, τα στιγμιαία δείγματα εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της ευκολίας συλλογής τους (WHO, 2003). Η επεξεργασία των δειγμάτων περιλαμβάνει στάδια όπως η καθίζηση, η διήθηση, η συγκέντρωση του ιού με οργανικούς διαλύτες ή πολυαιθυλενογλυκόλη (PEG), και τέλος η εκχύλιση του RNA ή η καλλιέργεια σε εκλεκτικές κυτταρικές σειρές. Η απομόνωση του ιού βασίζεται παραδοσιακά σε καλλιέργειες κυττάρων τύπου L20B και RD, σύμφωνα με τα πρότυπα του ΠΟΥ, αλλά οι σύγχρονες προσεγγίσεις δίνουν έμφαση σε μοριακές τεχνικές όπως

RT-qPCR για την ταχεία και ειδική ανίχνευση πολιοϊών και παραλλαγών τους (WHO, 2003; WHO, 2023).

Τα κριτήρια επιλογής των σταθμών δειγματοληψίας περιλαμβάνουν την πληθυσμιακή κάλυψη, την εγγύτητα σε εγκαταστάσεις υγειονομικού ενδιαφέροντος (π.χ. νοσοκομεία, κέντρα υποδοχής προσφύγων), και την ευκολία πρόσβασης. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην κάλυψη περιοχών με αυξημένη πιθανότητα εξάπλωσης του ιού λόγω πυκνότητας πληθυσμού ή χαμηλής εμβολιαστικής κάλυψης (WHO, 2023). Η πρόσφατη ευρωπαϊκή εμπειρία επιβεβαιώνει την αξία της περιβαλλοντικής δειγματοληψίας ως συμπληρωματικού εργαλείου στις δράσεις επιτήρησης. Σύμφωνα με μελέτη του ENPEN (Harvala et al., 2025), μεταξύ 2015 και 2022 συλλέχθηκαν 539.792 δείγματα σε 48 χώρες της ευρωπαϊκής περιοχής του ΠΟΥ (ΕΙΚΟΝΑ 4). Οι τρεις βασικές στρατηγικές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: α) δειγματοληψία σε περιπτώσεις AFP, β) κλινική επιτήρηση εντεροϊών και γ) περιβαλλοντική επιτήρηση μέσω λυμάτων. Η μελέτη αποκάλυψε σημαντική συμβολή των δειγμάτων λυμάτων στον εντοπισμό περιστατικών πολιοϊού, ιδίως σε χώρες όπου η κλινική επιτήρηση παρουσίαζε χαμηλή ευαισθησία.

	Year	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total
AFP	Countries reporting	36	39	41	39	38	34	33	33	
	Total	4018	4794	4439	4162	4140	2356	3382	3780	31,071
	EV	297	258	245	249	234	65	254	135	1737
	EV Types identified	28	25	22	22	15	3	8	9	
Clinical Enterovirus	Countries reporting	24	26	26	29	29	22	24	23	
	Total	2548	4488	3951	4025	4421	1893	4868	6365	32,559
	EV	640	847	1070	1176	1476	340	1767	3723	11,039
	EV Types identified	28	33	27	32	25	10	14	24	
Environmental	Countries reporting	18	19	20	24	24	19	21	20	
	Total	2495	3470	3332	3274	3172	2527	3440	3910	25,620
	EV	769	816	1027	1061	1051	594	941	1832	8091
	EV Types identified	31	19	24	25	28	20	30	26	
ENPEN	Countries reporting	24			15	15	15	16	16	
	Total	21,086			96,936	101,863	113,780	46,387	159,740	539,792
	EV	4144	6084	5686	7769	6836	2089	3681	8266	44,555
	EV Types identified	52	51	45	28	29	31	27	25	

Table 3: Countries reporting, samples collected and tested for enteroviruses, as well as samples found to be positive for enterovirus per year and surveillance system.

Εικόνα 4: Χώρες που αναφέρουν, δείγματα που συλλέχθηκαν και ελέγχθηκαν για εντεροϊούς, καθώς και δείγματα που βρέθηκαν θετικά για εντεροϊό ανά έτος και σύστημα επιτήρησης (Harvala et al., 2025).

Στην Ελλάδα, το σύστημα περιβαλλοντικής επιτήρησης έχει ενσωματωθεί σταδιακά σε εθνικές δράσεις δημόσιας υγείας, με έμφαση στην επιτήρηση μεταναστευτικών πληθυσμών και ευάλωτων ομάδων. Η μελέτη των Ioannidou et al. (2023) σε νεοαφιχθέντα παιδιά μεταναστών και προσφύγων έδειξε σημαντικά ποσοστά οροαρνητικότητας έναντι ενός ή περισσότερων τύπων πολιοϊού, ιδίως μεταξύ των

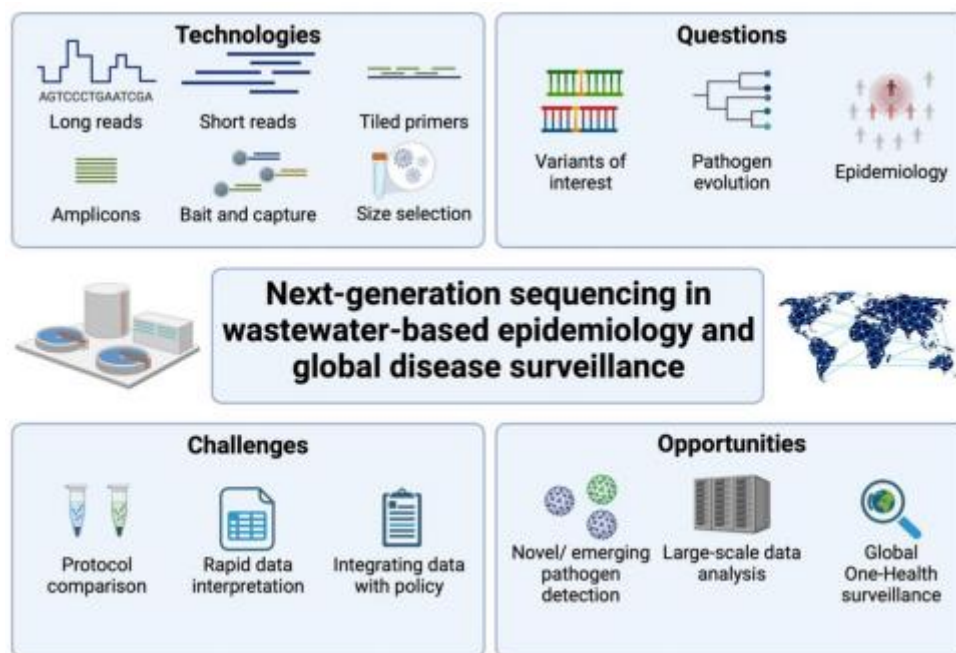
προσφυγόπουλων από ενδημικές περιοχές όπως το Αφγανιστάν. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι οι μετακινήσεις πληθυσμών από χώρες με κυκλοφορία πολιοϊού αποτελούν πιθανή πηγή επανεισαγωγής του ιού σε χώρες όπως η Ελλάδα, καθιστώντας την περιβαλλοντική επιτήρηση ακόμη πιο κρίσιμη (Ioannidou et al., 2023).

Η περιβαλλοντική επιτήρηση, αν και ιδιαίτερα αποτελεσματική, δεν είναι παντού ομοιόμορφα ανεπτυγμένη. Παρά τα κίνητρα για ευρύτερη εφαρμογή, πολλά κράτη μέλη του ΠΟΥ δεν διαθέτουν επαρκείς υποδομές ή εξειδικευμένο προσωπικό για την εφαρμογή της. Επιπλέον, η επιλογή του τύπου δείγματος και της τεχνικής ανάλυσης επηρεάζει άμεσα την ευαισθησία του συστήματος επιτήρησης. Γι' αυτό, το ΠΟΥ προτείνει την εφαρμογή εναρμονισμένων πρωτοκόλλων, την ενίσχυση των εθνικών εργαστηρίων και τη συνεχή εκπαίδευση των εμπλεκόμενων φορέων (WHO, 2023).

2.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Η ανίχνευση του πολιοϊού σε περιβαλλοντικά δείγματα αποτελεί κρίσιμο σκέλος των στρατηγικών εξάλειψης της πολιομυελίτιδας, εστιάζοντας στην έγκαιρη και ακριβή αναγνώριση της κυκλοφορίας του ιού. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε τρεις θεμελιώδεις τεχνικές: την καλλιέργεια του ιού σε κυτταροκαλλιέργειες κυττάρων, τη μοριακή ανίχνευση μέσω RT-PCR, και τη γονοτυπική τυποποίηση με αλληλούχιση της περιοχής VP1 του γονιδιώματος (WHO, 2003; WHO, 2023). Η αρχική φάση περιλαμβάνει την προεπεξεργασία και συμπύκνωση των δειγμάτων, συνήθως από υγρά απόβλητα ή επιφανειακά ύδατα. Χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η διφασική συγκέντρωση με δεξτράνη και πολυαιθυλενογλυκόλη (PEG), η υπερδιήθηση ή η κατακρήμνιση, με στόχο την αύξηση της συγκέντρωσης του ιικού φορτίου (WHO, 2003). Το συμπυκνωμένο δείγμα υποβάλλεται σε επεξεργασία με χλωροφόρμιο και φυγοκέντρωση για απομάκρυνση παρεμβαλλόμενων σωματιδίων και τοξικών ενώσεων.

Η καλλιέργεια σε κυτταρικές σειρές αποτελεί παραδοσιακή αλλά εξαιρετικά αξιόπιστη μέθοδο ανίχνευσης. Οι σειρές L20B (κύτταρα ποντικού με ανθρώπινο υποδοχέα CD155) και RD (κύτταρα ανθρώπινου σαρκόματος) χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά για τη διάκριση πολιοϊών από άλλους εντεροϊούς. Η L20B είναι ειδική για πολιοϊούς, ενώ η RD επιτρέπει την ανίχνευση και άλλων εντεροϊών που μπορεί να υποκρύπτονται (WHO, 2023). Η RT-PCR εφαρμόζεται είτε απευθείας σε περιβαλλοντικά δείγματα είτε μετά την καλλιέργεια, επιτρέποντας την ευαίσθητη ανίχνευση πολιοϊικού RNA, ακόμα και σε περιπτώσεις χαμηλού ιικού φορτίου ή ασυμπτωματικής κυκλοφορίας. Ειδικοί εκκινητές για περιοχές όπως η 5'-UTR ή η VP1 ενισχύουν την ειδικότητα, ενώ η ενσωμάτωση εσωτερικών ελέγχων διασφαλίζει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων (WHO, 2023; Duizer et al., 2023).



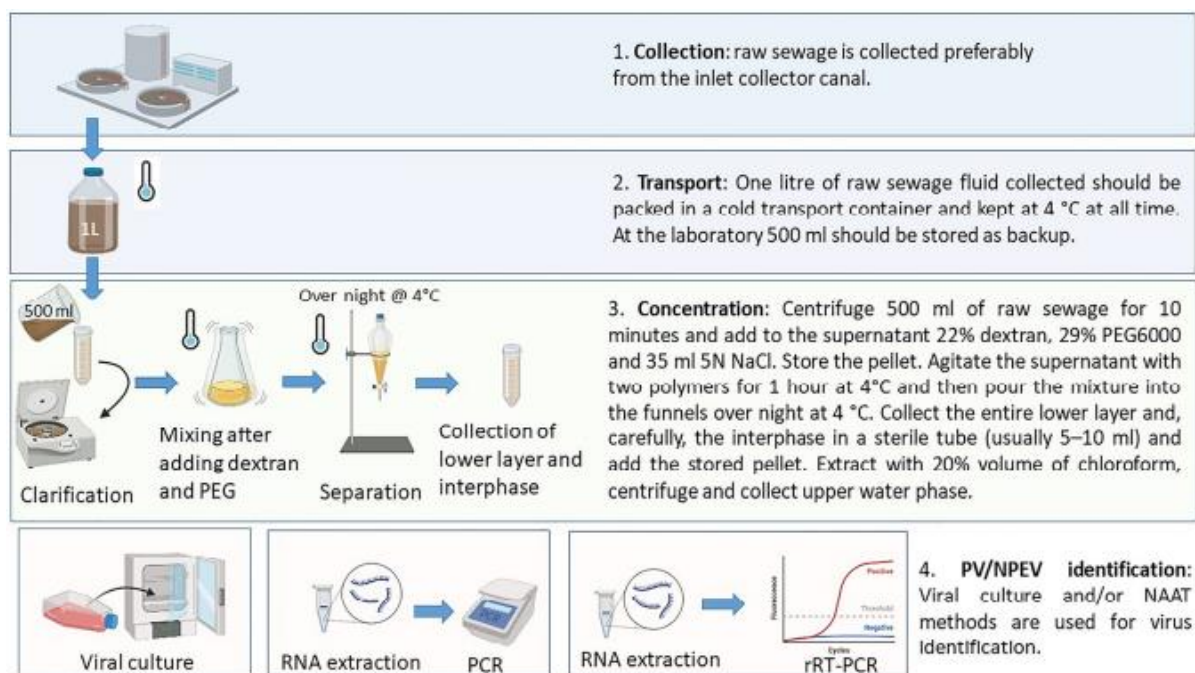
Εικόνα 5: Σύνοψη των τεχνολογιών αλληλούχησης, ερευνητικών στόχων, προκλήσεων και ευκαιριών που συνδέονται με την εφαρμογή της αλληλούχησης νέας γενιάς (NGS) στην επιδημιολογία βασισμένη στα υγρά απόβλητα (WBE) (Farkas et al., 2025).

Η τυποποίηση του πολιοϊού επιτυγχάνεται με αλληλούχηση της περιοχής VP1, μήκους περίπου 900 βάσεων, η οποία επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ άγριων τύπων (WPV), εμβολιαστικών (Sabin-like) και ανασυνδυασμένων στελεχών εμβολιακής προέλευσης (VDPV). Σύμφωνα με τα πρότυπα του ΠΟΥ (ΕΙΚΟΝΑ 6), απόκλιση άνω του 1% στην αλληλουχία VP1 υποδεικνύει κυκλοφορία εμβολιοσυνδεόμενου στελέχους VDPV (WHO, 2023). Οι τεχνολογίες αλληλούχησης νέας γενιάς (NGS) ενισχύουν την ικανότητα προσδιορισμού σύνθετων δειγμάτων με παρουσία μειονοτικών στελεχών ή μιγμάτων ιών, προσφέροντας πληροφορίες για τη γενετική σχέση και την εξελικτική προέλευση των στελεχών (Duizer et al., 2023; Marcet et al., 2025). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές, η NGS παρέχει πλήρη εικόνα του ιικού πληθυσμού ανά δείγμα και έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε περιστατικά κυκλοφορίας VDPV σε μεγάλες αστικές περιοχές όπως η Νέα Υόρκη και το Λονδίνο (Klapsa et al., 2022).

Η μεθοδος της άμεσης μοριακής ανίχνευσης (direct molecular detection DMD), η οποία επιτρέπει την άμεση ανάλυση RNA χωρίς καλλιέργεια, ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου το ικό φορτίο είναι χαμηλό ή υπάρχει περιορισμένη δυνατότητα κυτταροκαλλιέργειας. Η εφαρμογή της σε συνδυασμό με multiplex PCR ή NGS διευκολύνει την ταχεία ταυτοποίηση στόχων (WHO, 2023). Για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, η ΠΟΥ έχει αναπτύξει πρότυπα πρωτόκολλα (SOPs) για κάθε στάδιο της διαδικασίας, από τη συλλογή και μεταφορά δειγμάτων μέχρι την ανάλυση και αναφορά (WHO, 2003; WHO, 2023). Η εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου, η συμμετοχή σε εξωτερικά προγράμματα διαπίστευσης και η χρήση ελέγχων

εγκυρότητας είναι υποχρεωτικές για τα εργαστήρια που συμμετέχουν στο δίκτυο επιτήρησης.

Τέλος, η ενσωμάτωση της ψηφιακής τεχνολογίας και της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων ενισχύει τη δυνατότητα έγκαιρης αναγνώρισης τάσεων κυκλοφορίας του ιού. Πλατφόρμες βασισμένες σε τεχνητή νοημοσύνη, όπως το εργαλείο Freyja ή το COJAC, εφαρμόζονται πειραματικά σε συστήματα επιτήρησης βασισμένα στα υγρά απόβλητα, ενισχύοντας την ταχύτητα και την ακρίβεια ανίχνευσης (Karthikeyan et al., 2022).



Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση των βασικών εργαστηριακών σταδίων της περιβαλλοντικής επιτήρησης πολιοϊού, σύμφωνα με το πρωτόκολλο του ΠΟΥ (Bubba et al., 2023).

2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΓΟΝΙΔΙΩΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΛΙΟΪΟΥ

Η περιβαλλοντική επιτήρηση των πολιοϊών μέσω της ανάλυσης υγρών αποβλήτων αποτελεί στρατηγική αιχμής για την πρόληψη εξάρσεων, ειδικά σε εγκαταστάσεις κρίσιμης σημασίας όπως τα ερευνητικά εργαστήρια και τα κέντρα παραγωγής εμβολίων, γνωστά ως Poliovirus Essential Facilities (PEFs) (WHO, 2023). Οι εγκαταστάσεις αυτές φιλοξενούν στελέχη του ιού για ερευνητικούς ή παραγωγικούς σκοπούς, γεγονός που καθιστά επιβεβλημένη την αυστηρή και συνεχόμενη περιβαλλοντική παρακολούθηση, με στόχο τον έγκαιρο εντοπισμό διαρροών και την αποτροπή διασποράς στον γενικό πληθυσμό. Η αναλογία κρουσμάτων προς μολύνσεις των ιών πολιομυελίτιδας οδηγεί στην ανάγκη για συστήματα επιτήρησης υψηλής ευαισθησίας. Ο άγριος ιός πολιομυελίτιδας τύπου 1 (WPV1) έχει ποσοστό παράλυσης

ενός κρούσματος για κάθε 200 μολύνσεις (1:200), ενώ ο ιός πολιομυελίτιδας τύπου 2 (VDPV2) έχει ποσοστό μόλυνσης ενός κρούσματος για κάθε 2000 μολύνσεις (1:2000). Ιδιαίτερα καθώς τα εθνικά προγράμματα στοχεύουν στον VDPV2, ο οποίος έχει 90% χαμηλότερο ποσοστό μόλυνσης, η ES μπορεί να υποστηρίξει την έγκαιρη ανίχνευση και να επιτρέψει την ταχεία αντίδραση για την διακοπή μιας πιθανής έξαρσης (World Health Organization & Global Polio Eradication Initiative, 2023).

Η συστηματική επιτήρηση σε PEFs ακολουθεί πρότυπα που καθορίζονται στο Παγκόσμιο Σχέδιο Δράσης για τη Συγκράτηση του Πολιοϊού (GAPIII), το οποίο εφαρμόζεται μετά την πιστοποίηση εξάλειψης των WPV2 και WPV3. Το GAPIII προβλέπει δειγματοληψία λυμάτων κάθε τρεις εβδομάδες κατάντη των εγκαταστάσεων, συνδυασμένη με καλλιέργεια κυττάρων και μοριακή ανάλυση, καθώς και την άμεση εφαρμογή προγράμματος αντίδρασης σε περίπτωση ανίχνευσης πολιοϊού (WHO, 2025). Η διαδικασία περιλαμβάνει λήψη στιγμιαίων ή σύνθετων δειγμάτων από δίκτυα αποχέτευσης γύρω από τις PEFs, επεξεργασία με τη μέθοδο συγκέντρωσης δύο φάσεων (Two phase separation method)(δεξτράνη-PEG) ή υπερδιήθηση, και εφαρμογή RT-PCR για την ανίχνευση RNA του ιού. Παράλληλα εφαρμόζεται καλλιέργεια σε κυτταρικές σειρές τύπου L20B για την απομόνωση μολυσματικών σωματιδίων (WHO, 2003; Asghar et al., 2014). Η επιβεβαίωση θετικού ευρήματος απαιτεί χρήση και των δύο τεχνικών ώστε να διασφαλιστεί τόσο η ανίχνευση όσο και η ικανότητα μετάδοσης.

Η ανίχνευση WPV3 στα υγρά απόβλητα περιοχής της Ολλανδίας το 2022 (Duizer et al., 2023) υπογράμμισε την αξία της περιβαλλοντικής επιτήρησης σε χώρους με αυξημένο βιολογικό κίνδυνο. Παρά την ύπαρξη αυστηρών μέτρων βιοασφάλειας, το περιστατικό αυτό επιβεβαίωσε ότι δεν μπορεί να αποκλειστεί η πιθανότητα ακούσιας διαρροής. Η έγκαιρη κινητοποίηση των υγειονομικών αρχών, η απομόνωση του ασυμπτωματικού εργαζομένου και η αποτροπή ευρύτερης διασποράς αποτέλεσαν επιτυχές παράδειγμα εφαρμογής των αρχών του GAPIII στην πράξη. Η ανάγκη για λεπτομερή επιτήρηση ενισχύεται και από παλαιότερα περιστατικά διαρροής, όπως στην Ινδία το 2002 και στην Κίνα το 2011, όπου εντοπίστηκαν πολιοϊοί σε υγρά απόβλητα που αποδόθηκαν σε ανεπάρκεια μέτρων περιορισμού εντός των εγκαταστάσεων (Luo et al., 2013). Σε απάντηση, ο ΠΟΥ έχει εκδώσει αυστηρές κατευθυντήριες γραμμές που καθορίζουν τα κριτήρια λειτουργίας των PEFs, περιλαμβάνοντας έλεγχο πρόσβασης, αεροστεγή διαχωρισμό, πρωτόκολλα απολύμανσης, καθώς και πλήρες σχέδιο αντιμετώπισης περιστατικών.

Η γονιδιωματική ταυτοποίηση αποτελεί συμπληρωματικό εργαλείο μεγάλης σημασίας. Με την αλληλούχιση της περιοχής VP1, επιτυγχάνεται η διάκριση μεταξύ εμβολιαστικών, άγριων και ανασυνδυασμένων στελεχών. Όταν η γενετική απόκλιση από το στέλεχος αναφοράς Sabin υπερβαίνει το 1%, το στέλεχος θεωρείται ως πιθανό cVDPV (WHO, 2023). Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται από εξειδικευμένα εργαστήρια του ΠΟΥ, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Η χρήση τεχνολογιών αλληλούχισης νέας γενιάς

(NGS) έχει προσδώσει νέες δυνατότητες. Σε δείγματα με μικτό ιικό φορτίο, η NGS επιτρέπει την παράλληλη ταυτοποίηση πολλαπλών στελεχών, ακόμη και όταν ορισμένα εξ αυτών ανήκουν σε μειονοτικές πληθυσμιακές ομάδες ιών. Οι δυνατότητες αυτές είναι κρίσιμες για τον έγκαιρο εντοπισμό μεταλλάξεων που μπορεί να υποδηλώνουν εξελισσόμενη ανασυνδυασμένη κυκλοφορία (Duizer et al., 2023).

Επιπλέον, το πλαίσιο επιτήρησης διευρύνεται ώστε να περιλαμβάνει εγκαταστάσεις που δεν υπάγονται άμεσα στον ορισμό PEF αλλά διαθέτουν σχετικό υλικό, όπως ερευνητικά ιδρύματα, μονάδες αποθήκευσης ή διαγνωστικά εργαστήρια (Kumar et al., 2021). Ιδιαίτερης σημασίας είναι και η ύπαρξη εθνικών σχεδίων δράσης (contingency plans), τα οποία καθορίζουν την ακριβή διαδικασία αντιμετώπισης μετά από θετικό περιβαλλοντικό εύρημα. Τα σχέδια αυτά περιλαμβάνουν αξιολόγηση κινδύνου, απομόνωση, ιχνηλάτηση επαφών, δοκιμές ορού, και εάν απαιτείται, εκστρατείες εμβολιασμού στον τοπικό πληθυσμό. Η πρόβλεψη τέτοιων μηχανισμών αποτρέπει τη διολίσθηση σε ανεξέλεγκτη διασπορά και διασφαλίζει την ταχεία επανόρθωση της κατάστασης.

Ιστορικά παραδείγματα, όπως η επιδημία του 1996 στην Αλβανία, όπου απομονώθηκαν γενετικά ανασυνδυασμένοι πολιοϊοί από υγρά απόβλητα και ανθρώπινα δείγματα, αναδεικνύουν τη σημασία συνδυασμένης επιδημιολογικής και μοριακής επιτήρησης (Divizia et al., 1999). Η απουσία τέτοιων μηχανισμών είχε ως αποτέλεσμα την καθυστερημένη αναγνώριση της κυκλοφορίας και την αδυναμία άμεσης αντίδρασης. Συνοψίζοντας, η περιβαλλοντική επιτήρηση πολιοϊού σε εγκαταστάσεις υψηλού κινδύνου δεν αποτελεί συμπληρωματική δράση, αλλά αναπόσπαστο τμήμα της στρατηγικής διατήρησης της παγκόσμιας εξάλειψης της πολιομυελίτιδας. Η τεχνολογική πρόοδος και η θεσμοθέτηση αυστηρών προτύπων προσδίδουν στο σύστημα τη δυνατότητα να ανταποκριθεί άμεσα και αξιόπιστα σε κάθε ενδεχόμενο περιστατικό (Hovi et al., 2011).

2.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΡΜΗΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η ορθή ερμηνεία και επικύρωση των αποτελεσμάτων στην περιβαλλοντική επιτήρηση του πολιοϊού αποτελεί απαραίτητο στάδιο για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας, της συνέπειας και της χρηστικότητας των δεδομένων. Καθώς τα περιβαλλοντικά δείγματα χαρακτηρίζονται από υψηλή πολυπλοκότητα και ποικίλο ιικό φορτίο, απαιτείται η εφαρμογή αυστηρών και τυποποιημένων κριτηρίων για την αποδοχή ή την απόρριψη των ευρημάτων (WHO, 2023). Η ερμηνεία ενός θετικού ευρήματος βασίζεται συνήθως στον συνδυασμό διαφορετικών τεχνικών. Η απομόνωση πολιοϊού σε κυτταροκαλλιέργεια, ειδικά σε σειρές L20B, συνοδευόμενη από θετικό αποτέλεσμα RT-PCR, θεωρείται ένδειξη ενεργού ιογενούς παρουσίας (WHO, 2003; Marcet et al., 2025).

Η γονιδιωματική ταυτοποίηση, ειδικά με ανάλυση της περιοχής VP1, είναι καθοριστική για την επικύρωση του τύπου του πολιοϊού. Σύμφωνα με τα κριτήρια του

ΠΟΥ, στελέχη με ποσοστό ομοιότητας άνω του 99% με τα εμβολιαστικά Sabin χαρακτηρίζονται ως Sabin-like, ενώ αποκλίσεις >1% υποδηλώνουν VDPV (WHO, 2023). Αντίστοιχα, η ταυτοποίηση άγριου πολιοϊού (WPV) βασίζεται στη γενετική του ταυτότητα σε σχέση με γνωστά κυκλοφορούντα στελέχη από ενδημικές περιοχές. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων υποστηρίζεται από την ενσωμάτωση εσωτερικών και εξωτερικών ελέγχων. Τα εσωτερικά controls διασφαλίζουν την ορθότητα της RT-PCR (π.χ. human RNase P, θετικά/αρνητικά controls ανά κύκλο), ενώ οι έλεγχοι μόλυνσης ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο ψευδώς θετικών (Marcet et al., 2025; Duizer et al., 2023). Τα εργαστήρια οφείλουν να συμμετέχουν σε προγράμματα εξωτερικού ποιοτικού ελέγχου (EQA) που συντονίζονται από το Global Polio Laboratory Network, αποδεικνύοντας ικανότητα αναγνώρισης και χαρακτηρισμού διαφορετικών πολιοϊών υπό συνθήκες τύφλωσης (WHO, 2023).

Επιπρόσθετα, κάθε εργαστήριο καλείται να διατηρεί τεκμηριωμένα αρχεία αναφοράς, να επανεξετάζει τα αποτελέσματα υπό προϋποθέσεις, και να τεκμηριώνει κάθε απόκλιση από τις προβλεπόμενες διαδικασίες. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει μηχανισμούς ιχνηλασιμότητας, στατιστικής επαναληψιμότητας και αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος ανίχνευσης μέσω δείγματος ελέγχου ή blind panels. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην ερμηνεία μεικτών δειγμάτων, όπου ενδέχεται να συνυπάρχουν πολιοϊοί με άλλους εντεροϊούς. Η εφαρμογή NGS και η in silico ανάλυση αλληλουχιών επιτρέπουν την αποσαφήνιση της παρουσίας μειονοτικών πληθυσμών ή ανασυνδυασμένων στελεχών, που δεν μπορούν να εντοπιστούν με παραδοσιακές τεχνικές (Duizer et al., 2023).

Ένα ακόμα κρίσιμο στοιχείο επικύρωσης αποτελεί η ιχνηλασιμότητα των ευρημάτων. Τα δεδομένα πρέπει να καταγράφονται σε τυποποιημένες φόρμες, να τεκμηριώνονται με κωδικούς δειγμάτων, ημερομηνίες συλλογής, μεθόδους ανάλυσης και αποτελέσματα ανά τεχνική. Η ορθή τεκμηρίωση επιτρέπει την επαλήθευση σε περίπτωση αναφοράς ασυνήθιστου ευρήματος ή επιδημιολογικού συναγερμού. Η διαφάνεια στη διαχείριση των δεδομένων αποτελεί κρίσιμο κριτήριο επιστημονικής αξιοπιστίας. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του ΠΟΥ, η επιβεβαίωση ενός περιβαλλοντικού ευρήματος πολιοϊού θα πρέπει να ακολουθεί μια ιεραρχημένη προσέγγιση: (α) επιβεβαίωση καλλιέργειας, (β) επιβεβαίωση RT-PCR, (γ) μοριακή ταυτοποίηση μέσω VP1 sequencing, (δ) επιβεβαίωση από εξειδικευμένο περιφερειακό ή παγκόσμιο εργαστήριο (WHO, 2023).

Τέλος, οι αρχές δημόσιας υγείας καλούνται να χρησιμοποιήσουν τα επικυρωμένα αποτελέσματα για να σχεδιάσουν προσαρμοσμένες παρεμβάσεις. Η ταχεία κοινοποίηση ενός επιβεβαιωμένου θετικού ευρήματος από PEF ή από κοινότητα με χαμηλή εμβολιαστική κάλυψη μπορεί να ενεργοποιήσει μέτρα όπως επαναληπτικός εμβολιασμός, στοχευμένες ενημερωτικές καμπάνιες ή αυξημένη συχνότητα δειγματοληψιών. Η μετάβαση από την εργαστηριακή αναγνώριση στην επιχειρησιακή εφαρμογή είναι το τελικό και πιο κρίσιμο βήμα στην επιτυχία της περιβαλλοντικής επιτήρησης. Συνοψίζοντας, η αξιολόγηση ενός περιβαλλοντικού αποτελέσματος δεν

βασίζεται σε μία τεχνική, αλλά σε πολυπαραμετρική ερμηνεία, η οποία λαμβάνει υπόψη τη μέθοδο ανίχνευσης, την επαναληψιμότητα, τα ποιοτικά κριτήρια, τη γονοτυπική ταυτοποίηση και το πλαίσιο επιδημιολογικής συσχέτισης. Μόνο μέσω αυτής της ολιστικής προσέγγισης μπορεί να διασφαλιστεί ότι η επιτήρηση της πολιομυελίτιδας στηρίζεται σε επιστημονικά έγκυρα και δράσιμα δεδομένα.

3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

3.1 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΡΟΟΔΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΑΛΕΙΨΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΟΜΥΕΛΙΤΙΔΑΣ

Η πολιομυελίτιδα είναι μια ιδιαίτερα μεταδοτική νόσος που προκαλείται από τον ανθρώπινο εντεροϊό τύπου poliovirus (PV), μέλος της οικογένειας *Picornaviridae*, με κύριο μηχανισμό μετάδοσης τη στοματοκοπρανώδη οδό και κυρίαρχη παθοφυσιολογική εκδήλωση τη δυνατότητα πρόκλησης οξείας χαλαρής παράλυσης (Njile et al., 2024). Το 1988, με περισσότερες από 125 χώρες να παρουσιάζουν ενδημική κυκλοφορία του ιού και περισσότερα από 350.000 περιστατικά ετησίως, ιδρύθηκε η Παγκόσμια Πρωτοβουλία για την Εξάλειψη της Πολιομυελίτιδας (Global Polio Eradication Initiative – GPEI), υπό την αιγίδα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας και τη συνεργασία διεθνών εταίρων, όπως το CDC, η UNICEF και η Rotary International (WHO, 2023). Η στρατηγική του GPEI βασίστηκε σε τέσσερις βασικούς πυλώνες:

- (α) καθολική εμβολιαστική κάλυψη με από του στόματος πολιοεμβόλιο (OPV),
- (β) επιτήρηση των περιπτώσεων οξείας χαλαρής παράλυσης (AFP),
- (γ) περιβαλλοντική επιτήρηση με ανίχνευση ιού σε υγρά απόβλητα (ES) και
- (δ) ταχεία εφαρμογή συμπληρωματικών εμβολιαστικών εκστρατειών σε περιοχές με εντοπισμένη κυκλοφορία (Asghar et al., 2014; WHO, 2023).

Η εφαρμογή του συνδυασμένου αυτού μοντέλου είχε ως αποτέλεσμα, έως το 2022, τη μείωση της παγκόσμιας επίπτωσης της νόσου κατά 99,99% και τον περιορισμό της ενδημικής κυκλοφορίας του άγριου πολιοϊού (wild poliovirus – WPV) μόνο σε δύο χώρες: το Πακιστάν και το Αφγανιστάν (Klapsa et al., 2022).

Η εξάλειψη του WPV τύπου 2 (WPV2) ανακοινώθηκε επίσημα από τον ΠΟΥ το 2015, καθώς το στέλεχος αυτό δεν είχε ανιχνευθεί από το 1999 (WHO, 2021). Αντίστοιχα, ο WPV τύπου 3 (WPV3) καταγράφηκε για τελευταία φορά το 2012 και θεωρήθηκε εξαλείφθηκε παγκοσμίως το 2019 (WHO, 2023). Η κυκλοφορία του WPV τύπου 1 (WPV1) συνεχίζεται ενδημικά στις δύο παραπάνω χώρες, με σποραδικές εισαγωγές σε γειτονικές περιοχές όπως η Μοζαμβίκη και το Μαλάουι (Shabana et al., 2024). Η χρήση του OPV διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην ταχεία μείωση των κρουσμάτων, ωστόσο συνοδεύτηκε από την εμφάνιση και τη γεωγραφική επέκταση των παραγώγων

του εμβολίου πολιοϊών (vaccine-derived polioviruses – VDPVs), ιδιαίτερα των cVDPV2 (circulating type 2) μετά την απόσυρση του τριδύναμου εμβολίου (tOPV) το 2016 και την υιοθέτηση του διδύναμου bOPV (Cooper et al., 2025). Μεταξύ 2016 και 2023 καταγράφηκαν περισσότερες από 3.200 περιπτώσεις cVDPV2 παγκοσμίως, με τουλάχιστον 68 διαφορετικά γενετικά στελέχη σε περισσότερες από 30 χώρες (WHO, 2023; Cooper et al., 2025)

Η αυξημένη παρουσία των cVDPV2 οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης ενός πιο γενετικά σταθερού εμβολίου. Το novel OPV2 (nOPV2), ένα τροποποιημένο εμβόλιο που σχεδιάστηκε ώστε να μειώνει την πιθανότητα επανανευροποίησης και παθογένειας κατά τη μετάδοση από άτομο σε άτομο, έλαβε άδεια χρήσης σε συνθήκες επείγουσας ανάγκης από τον ΠΟΥ το 2020 (Harvala et al., 2025). Από την αρχική του διάθεση έως το τέλος του 2023, περισσότερες από 500 εκατομμύρια δόσεις nOPV2 είχαν διανεμηθεί σε 33 χώρες, στοχεύοντας σε περιοχές με συνεχιζόμενη κυκλοφορία cVDPV2 (Cooper et al., 2025). Τα επιδημιολογικά δεδομένα δείχνουν ότι το nOPV2 παρουσιάζει καλύτερη σταθερότητα και μικρότερο ρυθμό μεταλλάξεων, ενώ σε συγκριτικές αναλύσεις δεν διαφέρει σημαντικά ως προς την αποτελεσματικότητα πρόληψης παράλυσης σε σχέση με το mOPV2, με ενδείξεις υπεροχής του τελευταίου σε περιορισμένες μόνο γεωγραφικές περιοχές, όπως η Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό (Cooper et al., 2025). Παρά τις προόδους, η διαχείριση της κυκλοφορίας των cVDPV2 παραμένει μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις για την τελική εξάλειψη της νόσου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η συμβολή της περιβαλλοντικής επιτήρησης (ES) στην έγκαιρη ανίχνευση σιωπηρής κυκλοφορίας πολιοϊών. Σε αρκετές περιπτώσεις, η ES αποκάλυψε την παρουσία ιού σε πληθυσμούς χωρίς καμία αναφορά AFP. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Νέα Υόρκη (2022), όπου η ανίχνευση cVDPV2 σε υγρά απόβλητα προηγήθηκε του πρώτου κρούσματος παράλυσης (CDC, 2022), το Λονδίνο (2022), όπου καταγράφηκε συνεχής παρουσία Sabin-like 2 και cVDPV2 σε υγρά απόβλητα επί έξι μήνες χωρίς καμία επιβεβαιωμένη παράλυση (Jorba et al., 2022), και η Ιερουσαλήμ (2022), όπου η ES εντόπισε cVDPV3 πριν την κλινική εκδήλωση σε παιδί (WHO, 2022). Αξιοσημείωτη είναι και η περίπτωση της Κίνας, όπου το 2011 καταγράφηκε εισαγόμενο ξέσπασμα WPV1 στην επαρχία Xinjiang. Καταγράφηκαν 21 επιβεβαιωμένα περιστατικά και 23 συμβατές περιπτώσεις. Ο ιός ταυτοποιήθηκε τόσο σε ασθενείς όσο και σε υγιείς φορείς, καθώς και σε περιβαλλοντικά δείγματα (Luo et al., 2013). Η αντίδραση των υγειονομικών αρχών υπήρξε άμεση, με πέντε γύρους εμβολιασμού, εντατικοποίηση της επιτήρησης και εφαρμογή κοινωνικών μέτρων απομόνωσης, οδηγώντας στον έλεγχο της επιδημίας σε λιγότερο από δύο μήνες (Luo et al., 2013).

Η πανδημία COVID-19 ανέδειξε περαιτέρω την αξία του WBE (Wastewater-Based Epidemiology) και την ανάγκη ενσωμάτωσής του σε πολυπαραμετρικά μοντέλα πρόληψης και ελέγχου. Η υποδομή που αναπτύχθηκε για τον εντοπισμό του SARS-CoV2 αξιοποιείται πλέον για την επιτήρηση πολλαπλών παθογόνων, περιλαμβανομένου του πολιοϊού, και ενισχύει την προσέγγιση «One Health», που

αναγνωρίζει την ενιαία φύση της ανθρώπινης, ζωικής και περιβαλλοντικής υγείας (Klapsa et al., 2022; WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024). Προγράμματα όπως το GLOWACON και η πλατφόρμα EUWISH του ECDC προωθούν τη χρήση της ES ως στρατηγικό εργαλείο δημόσιας υγείας για την ανίχνευση επανεμφανιζόμενων ιών και την επιτήρηση ευάλωτων κοινοτήτων, αξιοποιώντας τις δυνατότητες της ψηφιακής επιτήρησης και της γεωχωρικής ανάλυσης (WHO, 2025; 2023).

Παρά την αξιοσημείωτη πρόοδο, η παγκόσμια εξάλειψη της πολιομυελίτιδας εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις που απειλούν την οριστική επιτυχία του εγχειρήματος. Πρώτον, η γεωπολιτική αστάθεια σε περιοχές όπως το Αφγανιστάν, η Σομαλία και η Βόρεια Νιγηρία δυσχεραίνει την εφαρμογή ολοκληρωμένων εμβολιαστικών προγραμμάτων και την ασφαλή διεξαγωγή επιτήρησης (Larson, 2013). Η απαγόρευση εμβολιασμών από ένοπλες ομάδες και η επίθεση σε υγειονομικό προσωπικό αποτελούν συχνά εμπόδια στην επιχειρησιακή εφαρμογή του GPEI. Δεύτερον, η μείωση της εμβολιαστικής κάλυψης ως συνέπεια της πανδημίας COVID-19 έχει δημιουργήσει «κενά ανοσίας» σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένων και αυτών με προηγουμένως υψηλή κάλυψη (Marcet et al., 2025). Οι επιδημιολόγοι προειδοποιούν ότι ακόμη και μικρά ποσοστά μη εμβολιασμένων ατόμων μπορούν να επιτρέψουν την αναζωπύρωση της κυκλοφορίας VDPV, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα πληθυσμών (Baguune et al., 2024).

Τρίτον, η πλήρης απομάκρυνση των ζωντανών στελεχών πολιοϊού από εργαστήρια και εγκαταστάσεις (PEFs) παραμένει τεχνικά και θεσμικά σύνθετη διαδικασία. Παρόλο που έχει εφαρμοστεί το Global Action Plan IV (GAPIV), η ύπαρξη ακόμη ενεργών PEFs και η καταγεγραμμένη διαρροή WPV3 στην Ολλανδία το 2022 καταδεικνύουν την ανάγκη για εντατικότερη εφαρμογή των πρωτοκόλλων βιοασφάλειας (Benedetti et al., 2024). Επιπλέον, η αντίσταση του πληθυσμού στον εμβολιασμό, συχνά λόγω θρησκευτικών ή πολιτισμικών πεποιθήσεων, καθώς και η παραπληροφόρηση που διακινείται μέσω κοινωνικών δικτύων, αποτελούν σημαντικά εμπόδια σε χώρες όπως το Πακιστάν, η Ινδία και η Νιγηρία. Η αντιμετώπιση της διστακτικότητας έναντι των εμβολίων απαιτεί συνδυασμό στρατηγικών επικοινωνίας κινδύνου, κοινοτικής συμμετοχής και μακροπρόθεσμης επένδυσης στην εμπιστοσύνη των πολιτών προς τους υγειονομικούς θεσμούς (Riaz et al., 2021).

Συνολικά, η πορεία προς την παγκόσμια εξάλειψη της πολιομυελίτιδας είναι εντυπωσιακή, ωστόσο η κατάσταση παραμένει εύθραυστη. Η διατήρηση υψηλής εμβολιαστικής κάλυψης, η επένδυση στην επιτήρηση –ειδικά μέσω της ES– και η ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας αποτελούν απαραίτητες συνιστώσες για την αποτροπή επανεμφάνισης της νόσου. Η εμπειρία του GPEI αποτελεί πρότυπο επιτυχημένης παγκόσμιας κινητοποίησης, όμως η τελική φάση της εξάλειψης απαιτεί μεγαλύτερη επαγρύπνηση, διεπιστημονική συνεργασία και δέσμευση για παγκόσμια ισότητα στην πρόσβαση στην πρόληψη (WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024; Njile et al., 2024).

3.2 ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΕΣ ΑΝΑΖΩΠΥΡΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Παρά τη θεαματική μείωση της παγκόσμιας επίπτωσης της πολιομυελίτιδας κατά περισσότερο από 99% από το 1988 έως σήμερα, η επανεμφάνιση περιστατικών, είτε από άγριο πολιοϊό (wild poliovirus – WPV) είτε από παράγωγα του εμβολίου (vaccine-derived polioviruses – VDPVs), αποκαλύπτει ότι η πλήρης εξάλειψη της νόσου παραμένει επισφαλής. Τα καταγεγραμμένα επεισόδια αναζωπύρωσης σε διαφορετικά γεωγραφικά, κοινωνικά και υγειονομικά πλαίσια αναδεικνύουν τις ευπάθειες των συστημάτων επιτήρησης, τη σημασία της έγκαιρης αντίδρασης, αλλά και την ανάγκη για παγκόσμιο συντονισμό στρατηγικών πρόληψης και ελέγχου (WHO, 2023; Cooper et al., 2025).

Ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελεί το ξέσπασμα WPV1 στην επαρχία Xinjiang της Κίνας το 2011. Αν και η χώρα είχε αναγνωριστεί ως «πολιο-ελεύθερη» από το 2000, η εισαγωγή του ιού από το Πακιστάν οδήγησε σε 21 επιβεβαιωμένα και 23 συμβατά περιστατικά, με τον ιό να ανιχνεύεται σε ασθενείς, ασυμπτωματικούς φορείς και περιβαλλοντικά δείγματα (Luo et al., 2013). Η εμπειρία αυτή ανέδειξε τη σημασία της ενίσχυσης των συστημάτων επιτήρησης και της ετοιμότητας ακόμη και σε χώρες με μακρόχρονη απουσία κυκλοφορίας πολιοϊού, καθώς και τη διασυννοριακή φύση του κινδύνου.

Ενδεικτική είναι επίσης η περίπτωση της Νέας Υόρκης, όπου το 2022 εντοπίστηκε παραλυτικό περιστατικό σε ανεμβολίαστο ενήλικα με λοίμωξη από cVDPV2. Η επακόλουθη περιβαλλοντική επιτήρηση αποκάλυψε την παρουσία του ίδιου στελέχους σε υγρά απόβλητα πέντε κομητειών, υποδεικνύοντας πολυεβδομαδιαία, σιωπηρή κυκλοφορία σε πληθυσμούς με χαμηλή εμβολιαστική κάλυψη (Baguune et al., 2024; Kalkowska et al., 2024). Το επεισόδιο αυτό οδήγησε σε ευρείας κλίμακας ενισχυτικές εκστρατείες με IPV και ενίσχυσε τη σημασία της περιβαλλοντικής επιτήρησης ως πρώιμου μηχανισμού εντοπισμού. Ανάλογη εξέλιξη καταγράφηκε το ίδιο έτος στο Ηνωμένο Βασίλειο, όπου ανιχνεύθηκαν cVDPV2 και Sabin-like στελέχη τύπου 2 σε υγρά απόβλητα του ανατολικού Λονδίνου επί συνεχόμενους μήνες. Αν και δεν καταγράφηκε κανένα περιστατικό AFP, η συνεχής παρουσία του ιού ενεργοποίησε στοχευμένη εκστρατεία εμβολιασμού παιδιών 1–9 ετών με αναμνηστική δόση IPV (Klapsa et al., 2022; Rowland et al., 2025). Η ανάλυση έδειξε ότι πιθανή πηγή ήταν άτομα με ιστορικό εμβολιασμού με OPV εκτός Ηνωμένου Βασιλείου, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σημασία της παγκόσμιας κάλυψης και της διαλειτουργικότητας των συστημάτων επιτήρησης.

Στο Ισραήλ, το 2022, η περιβαλλοντική επιτήρηση εντόπισε κυκλοφορία cVDPV3 σε υγρά απόβλητα, η οποία επιβεβαιώθηκε και από περιστατικό οξείας χαλαρής παράλυσης σε παιδί. Η γενετική ανάλυση των στελεχών κατέδειξε παρατεταμένη, σιωπηρή κυκλοφορία του ιού χωρίς προηγούμενη ανίχνευση μέσω του AFP surveillance. Η αντίδραση των αρχών περιλάμβανε στοχευμένη εμβολιαστική καμπάνια σε κοινότητες με χαμηλή κάλυψη, ενώ το γεγονός υπογράμμισε την ανάγκη

διατήρησης της ES ακόμη και σε χώρες με υψηλού επιπέδου συστήματα υγείας (WHO, 2023). Στην Αίγυπτο, την περίοδο 2020–2021, εντοπίστηκαν πέντε γενετικά διακριτές εξάρσεις cVDPV2 σε τέσσερις περιφέρειες της χώρας. Ο συνολικός αριθμός των περιπτώσεων ήταν 19, ενώ η μοριακή ανάλυση των απομονωθέντων στελεχών αποκάλυψε στενή συγγένεια με στελέχη που κυκλοφορούσαν στο Τσαντ, γεγονός που επιβεβαιώνει την πιθανότητα εισαγωγής μέσω μετακινούμενων πληθυσμών. Το σύστημα ES αποδείχθηκε κρίσιμο για την έγκαιρη ανίχνευση, ωστόσο η αντίδραση των αρχών περιορίστηκε λόγω καθυστερήσεων στη διάθεση του nOPV2 (Shabana et al., 2024).

Στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, μεταξύ 2017 και 2021, καταγράφηκαν 19 ξεχωριστές επιδημίες από cVDPV2 με 235 επιβεβαιωμένα περιστατικά. Τα δεδομένα συνδέθηκαν με χαμηλή εμβολιαστική κάλυψη, περιορισμένες εκστρατείες με mOPV2 και δυσκολία στην επιχειρησιακή διάθεση του nOPV2 σε απομακρυσμένες περιοχές (Cooper et al., 2025). Αντίστοιχες συνθήκες επικράτησαν στο Καμερούν, όπου από 12.354 δείγματα παιδιών με AFP κατά την περίοδο 2015–2020, το 11,4% ήταν θετικά για εντεροϊούς και από αυτά, το 19% για cVDPV2 (Njile et al., 2024). Οι αρχές ενίσχυσαν την περιβαλλοντική επιτήρηση κυρίως σε αστικά κέντρα, ενώ η αγροτική κάλυψη παρέμεινε ανεπαρκής. Ακόμη και χώρες με ανεπτυγμένα υγειονομικά συστήματα δεν παρέμειναν ανεπηρέαστες. Στην Πολωνία, καταγράφηκε το 2023 παρουσία cVDPV2 σε δείγματα υγρών αποβλήτων από δύο μεγάλες πόλεις, χωρίς καταγραφή περιστατικών AFP. Η ανίχνευση οδήγησε σε ενίσχυση του ελέγχου σε εθνικό επίπεδο, με ενεργοποίηση εργαστηριακών υποδομών που είχαν αναπτυχθεί κατά την πανδημία COVID-19 (Toro et al., 2024). Στη Γαλλική Γουιάνα, η παρουσία cVDPV3 σε περιβαλλοντικό δείγμα το 2022, χωρίς αναφορά εμβολιασμών με OPV στην περιοχή, υποδηλώνει εξωτερική εισαγωγή και τοπική διασπορά (Toro et al., 2024).

Οι περιπτώσεις αυτές αναδεικνύουν ότι η πολιομυελίτιδα παραμένει παγκόσμια απειλή όσο διατηρούνται θύλακες ανεπαρκούς ανοσίας, ανεπαρκούς επιτήρησης και δυσκολιών πρόσβασης σε έγκαιρο εμβολιασμό. Επίσης, η μετάβαση από tOPV σε bOPV και στη συνέχεια σε nOPV2, αν και τεχνικά αναγκαία, δημιουργήσε προσωρινά κενά ανοσίας ειδικά έναντι του τύπου 2, τα οποία ο ιός εκμεταλλεύτηκε για να επανεμφανιστεί (WHO, 2023; Cooper et al., 2025). Οι καταγεγραμμένες αναζωπυρώσεις της πολιομυελίτιδας αποκαλύπτουν ένα σύνολο πολυπαραγοντικών προκλήσεων που δυσχεραίνουν την τελική εξάλειψη του ιού. Πρώτη και πλέον θεμελιώδης είναι η ανισοκατανομή στην εμβολιαστική κάλυψη. Περιοχές με χαμηλή προσβασιμότητα σε εμβόλια ή υψηλή κοινωνικοπολιτισμική αντίσταση προς τον εμβολιασμό λειτουργούν ως θύλακες ευπάθειας, επιτρέποντας την επιμονή ή και την επανεμφάνιση του ιού ακόμη και μετά από χρόνια σιωπής (WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024).

Δεύτερη σημαντική πρόκληση είναι η επιχειρησιακή καθυστέρηση στην αντίδραση. Σε πολλές περιπτώσεις, η ανίχνευση του ιού σε υγρά απόβλητα ή η αναφορά AFP δεν

συνοδεύεται από άμεση κινητοποίηση εκστρατειών εμβολιασμού, είτε λόγω γραφειοκρατικών αγκυλώσεων, είτε λόγω έλλειψης επαρκούς διαθεσιμότητας nOPV2, είτε λόγω ανεπαρκών logistics σε απομακρυσμένες περιοχές (Cooper et al., 2025). Τρίτον, η τεχνική πολυπλοκότητα της ανίχνευσης και της τυποποίησης των στελεχών πολιοιού αποτελεί πρόβλημα, ιδίως σε χώρες με ανεπαρκώς εξοπλισμένα εργαστήρια. Η ανάγκη για προηγμένες τεχνικές, όπως RT-qPCR, ψηφιακή PCR και αλληλούχιση νέας γενιάς (NGS), ενισχύει τις ανισότητες μεταξύ κρατών ως προς την επιτήρηση (Girón-Guzmán et al., 2024).

Η κοινωνική δυσπιστία έναντι των εμβολίων, που ενισχύεται από παραπληροφόρηση, θρησκευτικές πεποιθήσεις ή και προηγούμενες αποτυχίες υγειονομικών παρεμβάσεων, αποτελεί σταθερό εμπόδιο σε περιοχές όπως η Βόρεια Νιγηρία, το Πακιστάν και το Αφγανιστάν. Η έλλειψη εμπιστοσύνης μεταφράζεται σε χαμηλή προσέλευση και μη συμμόρφωση με εμβολιαστικά προγράμματα, διατηρώντας ενεργό τον κίνδυνο τοπικής κυκλοφορίας (WHO, 2023). Επιπλέον, η διατήρηση ανοσοανεπαρκών ατόμων που αποβάλλουν πολιοϊό για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα έχει αναγνωριστεί ως σοβαρός βιολογικός παράγοντας διατήρησης του ιού στο ανθρώπινο οικοσύστημα. Αν και πρόκειται για σπάνιες περιπτώσεις, η επιτήρησή τους είναι δύσκολη και η επιδημιολογική τους σημασία δυνητικά σημαντική (Njile et al., 2024).

Τέλος, η κλιματική αλλαγή, η αστικοποίηση και η αυξημένη πληθυσμιακή κινητικότητα επιδρούν στις επιδημιολογικές συνθήκες και στη λειτουργία των δικτύων αποχέτευσης, επηρεάζοντας τη δυνατότητα πρόβλεψης και ανίχνευσης εξάρσεων. Η αυξημένη πυκνότητα πληθυσμού σε αστικές περιοχές επιτείνει τον κίνδυνο γρήγορης διασποράς, ενώ η ρύπανση ή η υποδομή παλαιού τύπου σε ορισμένες περιοχές καθιστά την περιβαλλοντική επιτήρηση λιγότερο αξιόπιστη (Girón-Guzmán et al., 2024). Συμπερασματικά, η διατήρηση του στόχου της παγκόσμιας εξάλειψης της πολιομυελίτιδας απαιτεί συνεχή εγρήγορση, επένδυση σε προληπτικά μέτρα και ενίσχυση της περιβαλλοντικής επιτήρησης σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο. Οι καταγεγραμμένες αναζωπυρώσεις αποτελούν όχι μόνο προειδοποιητικά σήματα, αλλά και πολύτιμες πηγές μάθησης για την ενίσχυση της ετοιμότητας των συστημάτων δημόσιας υγείας.

3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΠΙΔΗΜΙΟΛΟΓΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

Η επιτήρηση του πολιοιού αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της παγκόσμιας στρατηγικής για την εξάλειψη της πολιομυελίτιδας. Από την έναρξη της Παγκόσμιας Πρωτοβουλίας για την Εξάλειψη της Πολιομυελίτιδας (Global Polio Eradication Initiative – GPEI) το 1988 έως σήμερα, η έγκαιρη και αξιόπιστη ανίχνευση της κυκλοφορίας του ιού παραμένει θεμελιώδης προϋπόθεση για την επιτυχία οποιουδήποτε προγράμματος εμβολιασμού ή καταστολής (WHO, 2023). Η επιτήρηση επιτρέπει τον εντοπισμό των κενών στην εμβολιαστική κάλυψη, την ανίχνευση σιωπηρής κυκλοφορίας, την παρακολούθηση της εξέλιξης των στελεχών του ιού και, εν τέλει, την ενεργοποίηση

μηχανισμών άμεσης αντίδρασης σε τοπικό και διεθνές επίπεδο (Girón-Guzmán et al., 2024).

Οι δύο βασικοί πυλώνες επιτήρησης είναι η παρακολούθηση των περιστατικών οξείας χαλαρής παράλυσης (Acute Flaccid Paralysis – AFP surveillance) και η περιβαλλοντική επιτήρηση (Environmental Surveillance – ES), κυρίως μέσω της ανάλυσης αστικών λυμάτων. Η AFP επιτήρηση, αν και εξακολουθεί να αποτελεί τυπικά το βασικό εργαλείο του ΠΟΥ για την τεκμηρίωση της εξάλειψης, παρουσιάζει περιορισμούς, καθώς βασίζεται αποκλειστικά στην καταγραφή κλινικών περιστατικών και δεν ανιχνεύει την σιωπηρή κυκλοφορία του ιού (WHO, 2021). Αντίθετα, η ES επιτρέπει την έμμεση παρακολούθηση μεγάλων πληθυσμιακών ομάδων, ανεξαρτήτως προσβασιμότητας ή συμπτωματολογίας, μέσω της ανάλυσης δειγμάτων λυμάτων για την παρουσία γενετικού υλικού πολιοιού (Asghar et al., 2014).

Η ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής επιτήρησης στα εθνικά και διεθνή δίκτυα καταγραφής της πολιομυελίτιδας αποτελεί σημαντική εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών. Η εφαρμογή της καθιερώθηκε επίσημα το 2003 ως συμπληρωματική στρατηγική στο πλαίσιο του GPEI και μέχρι το 2023 είχε εγκατασταθεί σε περισσότερες από 60 χώρες (WHO, 2023). Με την πρόοδο της τεχνολογίας, η ευαισθησία και η ακρίβεια των μεθόδων ES έχει βελτιωθεί σημαντικά, επιτρέποντας την ανίχνευση ακόμη και μεμονωμένων περιστατικών αποδέσμευσης του ιού, όπως συνέβη στην Ολλανδία το 2022 με τον εντοπισμό WPV3 σε υγρά απόβλητα από PEF (Duizer et al., 2023). Ταυτόχρονα, η εφαρμογή τεχνικών όπως η RT-qPCR, η ψηφιακή PCR και η αλληλούχιση νέας γενιάς έχει ενισχύσει τη δυνατότητα ποιοτικής και ποσοτικής παρακολούθησης των κυκλοφορούντων στελεχών (Girón-Guzmán et al., 2024).

Ωστόσο, η εφαρμογή των συστημάτων επιτήρησης –είτε AFP είτε ES– διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με το επιδημιολογικό, κοινωνικοοικονομικό και διοικητικό πλαίσιο κάθε χώρας. Σε κράτη με πλήρη εξάλειψη της πολιομυελίτιδας αλλά με την παρουσία PEFs, η ES αποτελεί μέσο διασφάλισης έναντι ακούσιων αποδεσμεύσεων. Σε ενδημικές ή πρόσφατα επηρεασμένες περιοχές, λειτουργεί ως κρίσιμος αισθητήρας πρώιμης προειδοποίησης. Αντίστοιχα, σε χώρες με περιορισμένη πρόσβαση σε κλινικές υπηρεσίες ή με ελλείμματα στη συλλογή και αναφορά δεδομένων AFP, η ES συχνά αντικαθιστά εξ ολοκλήρου την παραδοσιακή επιτήρηση (Njile et al., 2024).

Η αποτελεσματικότητα της επιτήρησης επηρεάζεται επίσης από το επίπεδο εργαστηριακής υποδομής, τη γεωγραφική προσβασιμότητα, το πολιτικό πλαίσιο, αλλά και από παράγοντες όπως η κοινωνική αποδοχή, η εμπιστοσύνη του πληθυσμού και η διαφάνεια των θεσμών (World Health Organization, 2023). Σε χώρες με ιστορικά υψηλή αντίσταση στον εμβολιασμό, όπως η Βόρεια Νιγηρία και το Αφγανιστάν, η αξιόπιστη επιτήρηση συχνά εμποδίζεται από κοινωνικοπολιτισμικούς φραγμούς. Αντίθετα, χώρες όπως το Ισραήλ, η Ολλανδία και η Ιαπωνία έχουν επενδύσει σε

σταθερά δίκτυα WBE, τα οποία παρακολουθούν ταυτόχρονα πολιοϊό, SARS-CoV-2 και άλλους εντεροϊούς (Nakamura et al., 2015).

Καθώς η παγκόσμια κοινότητα προσεγγίζει την τελική φάση της εκρίζωσης, η επιτήρηση δεν είναι απλώς εργαλείο ανίχνευσης, αλλά εξελίσσεται σε πυλώνα βιοασφάλειας και στρατηγικού σχεδιασμού. Η διατήρηση και ενοποίηση των συστημάτων επιτήρησης –σε τεχνικό, διοικητικό και κοινωνικό επίπεδο– είναι απαραίτητη για την αποτροπή της επανεμφάνισης, είτε από φυσική κυκλοφορία, είτε από εργαστηριακές διαρροές. Η στρατηγική «One Health», η οποία προάγει τη διασύνδεση ανθρώπινης, ζωικής και περιβαλλοντικής υγείας, προσφέρει ένα νέο πλαίσιο για την ενοποίηση της επιτήρησης και την πρόβλεψη μελλοντικών απειλών (WHO, 2023;· Girón-Guzmán et al., 2024).

3.3.1 ΠΛΑΙΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΑ ΚΡΑΤΗ

Η εφαρμογή της περιβαλλοντικής επιτήρησης, όπως έχει ξανά αναφερθεί, σε ανεπτυγμένα κράτη αναδεικνύει τη στρατηγική σημασία της τεχνολογικά υποστηριζόμενης παρακολούθησης σε συνθήκες χαμηλού επιδημιολογικού κινδύνου αλλά υψηλού βιολογικού κινδύνου, λόγω της παρουσίας εργαστηρίων ή εγκαταστάσεων χειρισμού πολιοϊού (WHO, 2023). Παρά την απουσία ενδημικής κυκλοφορίας, κράτη όπως η Ολλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, οι Ηνωμένες Πολιτείες και το Ισραήλ συνεχίζουν να εφαρμόζουν ενισχυμένα πρωτόκολλα επιτήρησης, είτε στο πλαίσιο πρόληψης ακούσιων διαρροών από PEFs είτε για την έγκαιρη ανίχνευση σιωπηρής κυκλοφορίας του ιού σε μη εμβολιασμένους πληθυσμούς (WHO, 2021; Girón-Guzmán et al., 2024).

Η Ολλανδία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυστηρής συμμόρφωσης με το Global Action Plan IV του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, ο οποίος προβλέπει ενισχυμένα μέτρα παρακολούθησης σε όλες τις χώρες που διατηρούν εγκαταστάσεις χειρισμού ζωντανών στελεχών πολιοϊού (WHO, 2021). Το 2022, στο πλαίσιο της τακτικής επιτήρησης υγρών αποβλήτων γύρω από εγκατάσταση PEF, εντοπίστηκε άγριος πολιοϊός τύπου 3 (WPV3). Η προέλευση του στελέχους αποδόθηκε σε εργαζόμενο του εργαστηρίου που χειριζόταν WPV3 στο πλαίσιο εγκεκριμένων δραστηριοτήτων. Αν και ασυμπτωματικός, ο εργαζόμενος απέκρινε ιικό RNA στα κόπρανα, το οποίο εντοπίστηκε μέσω της περιβαλλοντικής επιτήρησης (Duizer et al., 2023). Η άμεση αντίδραση των ολλανδικών αρχών περιλάμβανε απομόνωση του εργαζομένου, διεύρυνση της δειγματοληψίας σε περισσότερα από 20 σημεία, ενεργοποίηση μέτρων βιοασφάλειας και κοινοποίηση του περιστατικού στην Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Πληροφοριών για την Πολιομυελίτιδα (Duizer, 2023). Κανένα από τα μεταγενέστερα δείγματα δεν εντοπίστηκε θετικό, γεγονός που επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητα του συστήματος επιτήρησης και της στρατηγικής πρόληψης (WHO, 2023).

Το Ηνωμένο Βασίλειο, μολονότι δεν φιλοξενεί PEFs, επανεπιβεβαίωσε τη σημασία της περιβαλλοντικής επιτήρησης το 2022, όταν ανιχνεύθηκαν cVDPV2 και Sabin-like type 2 πολιοϊοί σε δείγματα λυμάτων του βόρειου και ανατολικού Λονδίνου (Toro et al., 2024). Η κυκλοφορία του ιού παρέμεινε σιωπηρή για τουλάχιστον έξι μήνες, χωρίς να καταγραφούν περιστατικά οξείας χαλαρής παράλυσης. Το εθνικό σύστημα δημόσιας υγείας (UKHSA) ενεργοποίησε δίκτυο δειγματοληψίας σε περιοχές με χαμηλή εμβολιαστική κάλυψη και προχώρησε σε στοχευμένη αναμνηστική εμβολιαστική καμπάνια σε παιδιά ηλικίας 1–9 ετών (Girón-Guzmán et al., 2024). Η ετοιμότητα του συστήματος, σε συνδυασμό με την τεχνική ικανότητα των εργαστηρίων και τη συνεργασία μεταξύ κλινικών και περιβαλλοντικών φορέων, κατέδειξαν τη σημασία της ευέλικτης και προσαρμοστικής επιτήρησης σε αστικά περιβάλλοντα με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και μεγάλη ετερογένεια.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η επιτήρηση αναδείχθηκε ως κρίσιμος μηχανισμός διαχείρισης κινδύνου έπειτα από το περιστατικό του 2022 στη Νέα Υόρκη. Ένας ανεμβολίαστος ενήλικας εμφάνισε οξεία χαλαρή παράλυση, με εργαστηριακή επιβεβαίωση cVDPV2. Η επακόλουθη περιβαλλοντική επιτήρηση αποκάλυψε παρουσία του ίδιου στελέχους σε υγρά απόβλητα πέντε κομητειών, γεγονός που υποδήλωσε παρατεταμένη και εκτεταμένη σιωπηρή κυκλοφορία του ιού (Shabana et al., 2024). Παρά την κινητοποίηση τοπικών αρχών και την ενίσχυση του εμβολιαστικού προγράμματος, καταγράφηκαν καθυστερήσεις στην απόκριση και ανομοιογένεια μεταξύ διαφορετικών πολιτειακών διοικήσεων (Kalkowska et al., 2015). Το επεισόδιο αυτό ανέδειξε την ανάγκη για καθολική και συντονισμένη εφαρμογή ES σε ομοσπονδιακά οργανωμένα κράτη, καθώς και την αναθεώρηση των πρωτοκόλλων απόκρισης.

Το Ισραήλ παρουσιάζει σταθερά ένα από τα πιο ολοκληρωμένα και αποτελεσματικά μοντέλα περιβαλλοντικής επιτήρησης πολιοϊού στον ανεπτυγμένο κόσμο. Το 2022, η ανίχνευση cVDPV3 σε υγρά απόβλητα συνοδεύτηκε από επιβεβαιωμένο περιστατικό οξείας χαλαρής παράλυσης, γεγονός που κινητοποίησε εθνικές και τοπικές αρχές σε άμεση εφαρμογή συμπληρωματικών εμβολιαστικών εκστρατειών, ιδιαίτερα σε περιοχές με γνωστά κενά εμβολιασμού, όπως οι ορθόδοξες εβραϊκές κοινότητες (WHO, 2023). Η διαχρονική επένδυση του Ισραήλ στην ενσωμάτωση της ES στον δημόσιο υγειονομικό σχεδιασμό αποτελεί υπόδειγμα πρόληψης, διαχείρισης κινδύνου και κοινωνικής προσαρμοστικότητας των παρεμβάσεων.

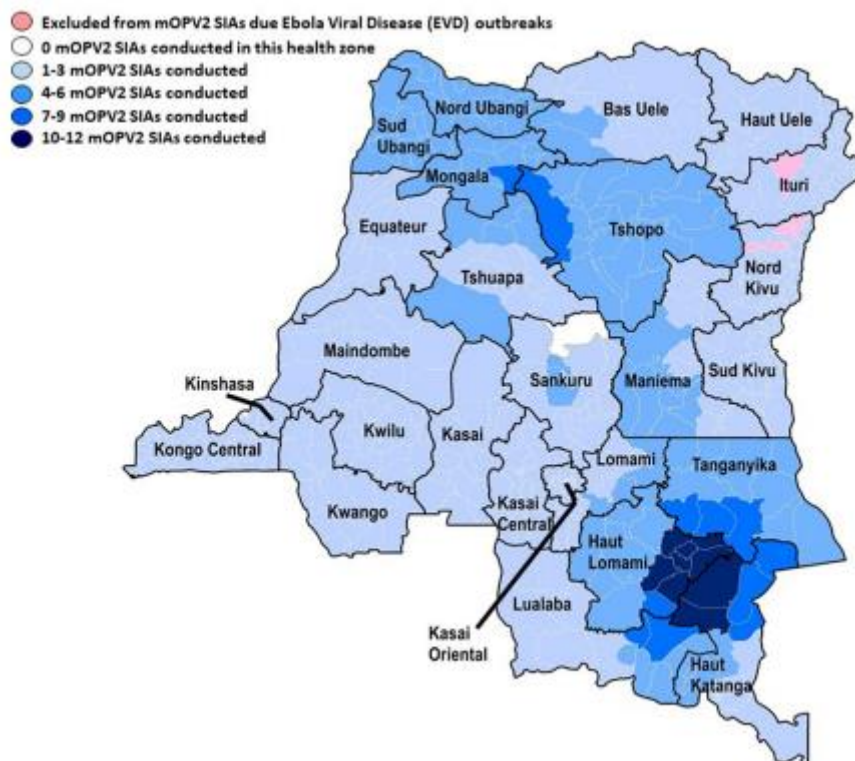
Τα παραδείγματα από τις παραπάνω χώρες επιβεβαιώνουν ότι στα ανεπτυγμένα κράτη η ES δεν περιορίζεται στην αντίδραση, αλλά αναβαθμίζεται σε δομικό στοιχείο πρόληψης και διαχείρισης βιολογικού κινδύνου. Η τεχνική δυνατότητα ακριβούς ανάλυσης, η ύπαρξη εκπαιδευμένου προσωπικού, η λειτουργία διαλειτουργικών συστημάτων πληροφοριών και η θεσμική ετοιμότητα συνιστούν παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων (Girón-Guzmán et al., 2024). Ταυτόχρονα, η σημασία της κοινωνικής αποδοχής, της

διαφάνειας και της έγκαιρης επικοινωνίας επιβεβαιώνεται ως προϋπόθεση για τη βιωσιμότητα και την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων (Klasa et al., 2022).

3.3.2 ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ – ΜΕΣΑΙΟΥ ΕΙΣΟΔΗΜΑΤΟΣ

Η εφαρμογή περιβαλλοντικής επιτήρησης σε χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις συγκριτικά με τα ανεπτυγμένα κράτη, λόγω της περιορισμένης υλικοτεχνικής υποδομής, της ανεπαρκούς εργαστηριακής κάλυψης και της ασταθούς πολιτικοδιοικητικής οργάνωσης. Σε αυτά τα πλαίσια, η περιβαλλοντική επιτήρηση καλείται συχνά να λειτουργήσει όχι συμπληρωματικά αλλά ως βασικός ή και αποκλειστικός μηχανισμός εντοπισμού της κυκλοφορίας του πολιοϊού, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η AFP surveillance είναι ασθενής ή αναξιόπιστη (WHO, 2023).

Στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό (DRC), η παρουσία cVDPV2 έχει καταγραφεί επανειλημμένα την τελευταία δεκαετία. Μεταξύ 2017 και 2021 καταγράφηκαν συνολικά 19 ξεχωριστές επιδημικές εξάρσεις, με 235 επιβεβαιωμένα περιστατικά (EIKONA 7). Η καθυστέρηση στην υλοποίηση εμβολιαστικών εκστρατειών, σε συνδυασμό με την περιορισμένη διαθεσιμότητα nOPV2 και τη δυσκολία πρόσβασης σε απομακρυσμένες περιοχές, συνέβαλε στη συνεχιζόμενη κυκλοφορία του ιού (Cooper et al., 2025). Παρότι υπήρξαν περιορισμένες προσπάθειες ενίσχυσης της ES σε αστικά κέντρα, η συνολική επιτήρηση παρέμεινε ασυνεπής λόγω ελλείψεων σε εργαστηριακές υποδομές, ανθρώπινο δυναμικό και σταθερή χρηματοδότηση (WHO, 2023).



Εικόνα 7: Συνολικός αριθμός εκστρατειών συμπληρωματικού εμβολιασμού με mOPV2 (SIAAs) στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό ανά υγειονομική περιφέρεια, σε απάντηση σε επιδημίες cVDPV2 (Ιούνιος 2017-Απρίλιος 2021) (Alleman et al., 2023).

Ανάλογη ήταν η εικόνα στο Καμερούν, όπου η επιτήρηση της πολιομυελίτιδας βασίστηκε κυρίως σε δείγματα κοπράνων από παιδιά με AFP, με την περιβαλλοντική επιτήρηση να είναι ελάχιστα αναπτυγμένη. Ανάλυση 12.354 δειγμάτων την περίοδο 2015–2020 έδειξε ότι 11,4% ήταν θετικά σε εντεροϊούς, ενώ μεταξύ των θετικών δειγμάτων παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της παρουσίας cVDPV2 μετά το 2020 (Njile et al., 2024). Η ανίχνευση του ιού μέσω AFP έγινε όταν η κυκλοφορία ήταν ήδη εγκατεστημένη στην κοινότητα, γεγονός που καθυστέρησε την αντίδραση. Το γεωγραφικό ανάγλυφο, η αδυναμία σταθερής μεταφοράς δειγμάτων και η περιορισμένη εμβολιαστική κάλυψη συνέβαλαν στην ανεπαρκή επιδημιολογική επιτήρηση.

Αντίθετα, στη Γκάνα εφαρμόστηκε συνδυασμένο μοντέλο επιτήρησης. Το 2019, εντοπίστηκε cVDPV2 σε υγρά απόβλητα στην περιφέρεια North East, γεγονός που προηγήθηκε της εμφάνισης επιβεβαιωμένου περιστατικού οξείας χαλαρής παράλυσης. Η ενεργοποίηση του συστήματος ES επέτρεψε την έγκαιρη παρέμβαση και την υλοποίηση τριών γύρων εμβολιασμού, γεγονός που τελικά απέτρεψε την εξάπλωση του ιού (Honvi et al., 2012). Το σύστημα περιλάμβανε καθορισμένα σημεία δειγματοληψίας, καταγραφή δεικτών απόδοσης, όπως χρόνος μεταφοράς και επεξεργασίας δειγμάτων, και ενεργό συμμετοχή των τοπικών αρχών. Οι δείκτες ποιότητας του συστήματος ξεπέρασαν τους στόχους του ΠΟΥ, τεκμηριώνοντας τη βιωσιμότητα της ES ακόμα και

σε συνθήκες περιορισμένων πόρων, όταν υπάρχει πολιτική βούληση και θεσμική συνεργασία.

Η περίπτωση της Αιγύπτου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η χώρα διαθέτει μακροχρόνια εμπειρία στην επιτήρηση πολιοιού. Το 2020–2021 καταγράφηκαν πέντε διακριτές αλυσίδες μετάδοσης cVDPV2 σε τέσσερις γεωγραφικές περιφέρειες. Οι μοριακές αναλύσεις έδειξαν γενετική συσχέτιση με στελέχη από το Τσαντ, γεγονός που υποδεικνύει εισαγωγή του ιού μέσω πληθυσμιακής κινητικότητας και όχι εγχώρια επανεμφάνιση (Shabana et al., 2024). Η ΕS εφαρμόστηκε κυρίως στο Κάιρο και σε μεγάλες επαρχιακές πόλεις, ενώ η απόκριση των αρχών χαρακτηρίστηκε από καθυστερήσεις λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας nOPV2 και της πολυπλοκότητας της υγειονομικής διοίκησης.

Οι εμπειρίες των παραπάνω χωρών αναδεικνύουν ότι η αποτελεσματική εφαρμογή περιβαλλοντικής επιτήρησης σε περιοχές χαμηλού ή μεσαίου εισοδήματος εξαρτάται όχι μόνο από την τεχνική ικανότητα αλλά και από την ευρύτερη διοικητική και κοινωνική συνοχή. Σε χώρες όπου η ΕS έχει ενσωματωθεί σε εθνικούς σχεδιασμούς υγειονομικής ασφάλειας και υποστηρίζεται από διεθνείς συνεργασίες, αποδεικνύεται εργαλείο πρόγνωσης και πρόληψης. Αντίθετα, σε πλαίσια όπου η επιτήρηση παραμένει αποσπασματική, οι δυνατότητές της περιορίζονται σημαντικά. Η διασφάλιση χρηματοδότησης, η εκπαίδευση του προσωπικού, η εγκατάσταση βασικών εργαστηριακών υποδομών και η εναρμόνιση με τα διεθνή πρότυπα αποτελούν θεμελιώδεις προϋποθέσεις για τη βιώσιμη εφαρμογή της ΕS σε χώρες που φέρουν το μεγαλύτερο βάρος του υπολειπόμενου επιδημιολογικού κινδύνου παγκοσμίως (WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024).

3.3.3 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕS ΣΕ ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WBE

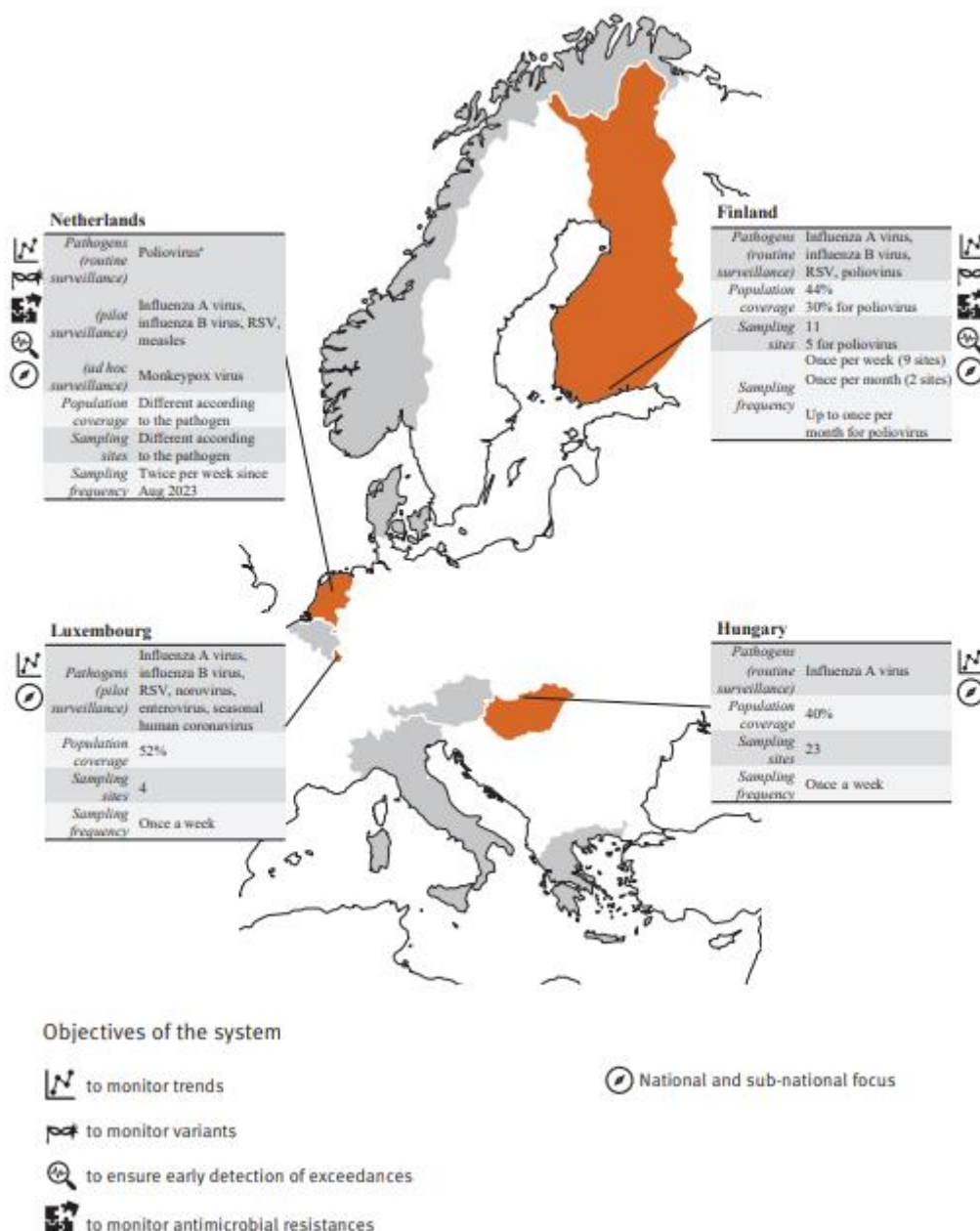
Η μετάβαση από την παραδοσιακή επιτήρηση συγκεκριμένων παθογόνων, όπως ο πολιοιός, σε ολιστικά μοντέλα επιτήρησης με βάση τα υγρά απόβλητα (wastewater-based epidemiology – WBE) αντιπροσωπεύει ένα από τα πλέον ραγδαία εξελισσόμενα πεδία δημόσιας υγείας κατά την τελευταία δεκαετία. Η εμπειρία της πανδημίας COVID-19 επιτάχυνε τη διαμόρφωση υποδομών WBE σε παγκόσμια κλίμακα και άνοιξε νέους ορίζοντες για την ταυτόχρονη παρακολούθηση πολλών παθογόνων, συμπεριλαμβανομένου του πολιοιού, των εντεροϊών, των ηπατιτίδων, των ιών της γρίπης και του SARS-CoV-2 (Girón-Guzmán et al., 2024) (EIKONA 8).

Η Ιαπωνία υπήρξε από τις πρώτες χώρες που ενσωμάτωσαν την επιτήρηση του πολιοιού σε πολυτροπικά δίκτυα WBE. Σε μελέτη του Yoshida και συνεργατών (2024), παρουσιάστηκε η επιτήρηση σε δίκτυα αποχέτευσης μεγάλων πόλεων γύρω από την περίοδο εισαγωγής του IPV αντί του OPV, όπου τεκμηριώθηκε σημαντική μείωση της παρουσίας Sabin-like πολιοϊών, καθώς και περιοδική ανίχνευση μη πολιοϊκών εντεροϊών (NPEVs), χωρίς παρουσία WPV ή VDPV. Η δυνατότητα ταυτόχρονης παρακολούθησης πολλαπλών εντεροϊών καθιστά τα δίκτυα αυτά πιο αποδοτικά και

ευέλικτα, ενώ παράλληλα ενισχύει την ικανότητα πρόβλεψης νέων κινδύνων. Ανάλογες πρακτικές παρατηρούνται και στην Κίνα, όπου το σύστημα WBE συνδέεται με εθνικές βάσεις δεδομένων επιτήρησης για λοιμώδη νοσήματα. Στην επαρχία Φουτζιάν, μακροχρόνια παρακολούθηση (2013–2021) έδειξε διαχρονική μείωση των NPEVs και πλήρη εξαφάνιση του PV2 από τα υγρά απόβλητα μετά την υιοθέτηση bOPV και την απόσυρση του tOPV, γεγονός που καταγράφηκε με υψηλή αξιοπιστία μέσω RT-qPCR και αλληλούχισης (Nakamura et al., 2015). Η διασύνδεση WBE με την ψηφιακή επιτήρηση και τη γεωχωρική ανάλυση επιτρέπει τη στοχευμένη κατανομή πόρων και την αξιολόγηση των κινδύνων ανά περιοχή.

Η Βραζιλία έχει αναπτύξει ένα σύνθετο μοντέλο ενσωμάτωσης κοινωνικών, δημογραφικών και επιδημιολογικών δεδομένων σε στρατηγικές WBE. Με βάση δείκτες όπως η πυκνότητα πληθυσμού, η φτώχεια, η πρόσβαση σε υπηρεσίες υγείας και το ποσοστό εγκατάλειψης του βασικού εμβολιαστικού σχήματος, οι υγειονομικές αρχές χαρτογράφησαν «ζώνες ευαλωτότητας» και εγκατέστησαν δίκτυα ES για την παρακολούθηση του πολιοϊού και άλλων παθογόνων (Girón-Guzmán et al., 2024). Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την ανίχνευση σιωπηρών θυλάκων και την προσαρμογή των παρεμβάσεων πριν την εμφάνιση κλινικών περιστατικών.

Σε διεθνές επίπεδο, ο ΠΟΥ σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και το ECDC προώθησαν την ίδρυση του GLOWACON (Global Consortium for Wastewater and Environmental Surveillance for Public Health), το οποίο στοχεύει στην καθολική εφαρμογή WBE για την ταυτόχρονη επιτήρηση πολλαπλών παθογόνων (WHO, 2023). Το GLOWACON ενισχύει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ εργαστηρίων, την εναρμόνιση των μεθοδολογιών και την έγκαιρη ανταλλαγή δεδομένων, ενώ περιλαμβάνει εκπαίδευση εθνικών φορέων και ανάπτυξη οδηγών εφαρμογής. Το μοντέλο αυτό υιοθετήθηκε και από την ευρωπαϊκή πλατφόρμα EU-WISH, η οποία συντονίζει τη συλλογή και ανάλυση λυμάτων από αστικά κέντρα της Ε.Ε., συνδέοντας τα δεδομένα αυτά με τα εθνικά επιδημιολογικά συστήματα (Klapsa et al., 2022). Στόχος της πρωτοβουλίας είναι η δημιουργία ενός ψηφιακού «ραντάρ δημόσιας υγείας» για αναδυόμενα νοσήματα.



Εικόνα 8: Επισκόπηση των εθνικών και περιφερειακών συστημάτων πολυπαραμετρικής επιτήρησης υγρών αποβλήτων σε 10 ευρωπαϊκές χώρες για παθογόνα πλην του SARS - CoV-2. Συμπεριλαμβάνεται η παρακολούθηση του πολιοϊού σε Φινλανδία και Ολλανδία, στο πλαίσιο ολιστικών στρατηγικών WBE (Benedetti et al., 2024).

Η ενσωμάτωση της ES σε συστήματα WBE προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα: μεγιστοποιεί την απόδοση της εργαστηριακής προσπάθειας, βελτιώνει την πρόβλεψη επιδημιολογικών μεταβολών και επιτρέπει την πρόωπη παρέμβαση. Ταυτόχρονα, όμως, συνοδεύεται από προκλήσεις όπως η ανάγκη για τυποποίηση των μεθόδων, η εξασφάλιση επαναληψιμότητας, η ηθική χρήση των δεδομένων και η κοινωνική αποδοχή της συλλογής λυμάτων. Η ευθυγράμμιση των εθνικών στρατηγικών με τα πρότυπα του ΠΟΥ και η σταδιακή ένταξη του WBE στο πλαίσιο του One Health

αποτελούν προ απαιτούμενα για τη βιώσιμη αξιοποίηση αυτών των εργαλείων (WHO, 2023).

3.3.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η επιτυχία ή αποτυχία της εφαρμογής περιβαλλοντικής επιτήρησης πολιοιού εξαρτάται από μια πληθώρα παραγόντων, οι οποίοι αφορούν τεχνικές, θεσμικές, κοινωνικές και επιδημιολογικές διαστάσεις. Οι παραλλαγές στη λειτουργία της ES σε διαφορετικές χώρες και περιοχές καταδεικνύουν ότι δεν υπάρχει ενιαίο πρότυπο εφαρμογής. Αντίθετα, απαιτείται συνδυασμός ευελιξίας, τεκμηριωμένης στρατηγικής και διατομεακής συνεργασίας, προσαρμοσμένος στις ανάγκες κάθε επιδημιολογικού πλαισίου (WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024).

Σε τεχνικό επίπεδο, κρίσιμος παράγοντας επιτυχίας είναι η ύπαρξη καλά οργανωμένων εργαστηριακών υποδομών, ικανών να πραγματοποιούν RT-qPCR, ψηφιακή PCR (dPCR) και αλληλούχιση νέας γενιάς (NGS) με επαναληψιμότητα και αξιοπιστία. Αυτές οι τεχνικές είναι απαραίτητες για τη διάκριση μεταξύ WPV, VDPV και Sabin-like στελεχών, καθώς και για την ιχνηλάτηση της γεωγραφικής ή εργαστηριακής προέλευσης του ιού (Girón-Guzmán et al., 2024). Σε χώρες όπου η τεχνική δυνατότητα είναι περιορισμένη, παρατηρούνται καθυστερήσεις ή ανακρίβειες στην ταυτοποίηση, οδηγώντας σε μη έγκαιρη ενεργοποίηση μέτρων.

Η γεωγραφική κάλυψη του δικτύου επιτήρησης και η πυκνότητα των σημείων δειγματοληψίας αποτελούν επίσης καθοριστικούς δείκτες απόδοσης. Η επαρκής κατανομή σημείων συλλογής σε σχέση με το πληθυσμιακό φορτίο και τη ροή των αποβλήτων εξασφαλίζει την αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων και την έγκαιρη ανίχνευση σιωπηρής κυκλοφορίας (WHO, 2021). Η εμπειρία από την Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο έδειξε ότι η στρατηγική χαρτογράφησης των αποχετευτικών δικτύων ενισχύει την ακρίβεια της επιτήρησης (Duizer, 2023; Toro et al., 2024).

Σε θεσμικό επίπεδο, η επιτυχία της ES εξαρτάται από τη θεσμοθέτησή της ως μόνιμου μηχανισμού δημόσιας υγείας. Η ένταξη της επιτήρησης υγρών αποβλήτων στον υγειονομικό σχεδιασμό απαιτεί νομική κατοχύρωση, διαρκή χρηματοδότηση και καθορισμό αρμοδιοτήτων μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, συμπεριλαμβανομένων των υπουργείων υγείας, περιβάλλοντος και των δημοτικών υπηρεσιών (WHO, 2023). Σε χώρες με ασταθές διοικητικό περιβάλλον ή έλλειψη θεσμικής συνέχειας, η ES καταλήγει να εφαρμόζεται αποσπασματικά ή να εξαρτάται από εξωτερική τεχνική υποστήριξη.

Οι κοινωνικές προϋποθέσεις αποτελούν επίσης σημαντικό κριτήριο βιωσιμότητας. Η αποδοχή της επιτήρησης υγρών αποβλήτων από τον πληθυσμό συνδέεται με την εμπιστοσύνη στις δημόσιες αρχές, τη διαφάνεια στη διαχείριση των δεδομένων και την αποφυγή στιγματισμού κοινοτήτων. Σε πολλές περιπτώσεις, όπως στο Πακιστάν και τη Βόρεια Νιγηρία, η καχυποψία απέναντι σε προγράμματα εμβολιασμού επηρέασε

αρνητικά και την αποδοχή της επιτήρησης (WHO, 2023). Η ενίσχυση της κοινωνικής συμμετοχής, η κοινοτική ευαισθητοποίηση και η επικοινωνία κινδύνου με πολιτισμικά κατάλληλο τρόπο είναι απαραίτητες για την επιτυχία της επιτήρησης σε τέτοια περιβάλλοντα.

Η πρόκληση της έγκαιρης κοινοποίησης και ανταλλαγής δεδομένων, τόσο εντός εθνικών συστημάτων όσο και μεταξύ χωρών, παραμένει ένα σημαντικό διοικητικό εμπόδιο. Ο ΠΟΥ, μέσω της Πλατφόρμας EPIS και του GLOWACON, προωθεί την υιοθέτηση ανοικτών συστημάτων αναφοράς, τα οποία ενισχύουν τη διαλειτουργικότητα και τη διαφάνεια (WHO, 2023). Παρόλα αυτά, σε ορισμένες χώρες οι περιορισμοί στην πρόσβαση σε δεδομένα, η γραφειοκρατία ή η έλλειψη πολιτικής βούλησης εμποδίζουν την υλοποίηση των βέλτιστων πρακτικών.

Τέλος, η μετάβαση σε πολυπαραμετρικά συστήματα WBE, στα οποία η επιτήρηση του πολιοιού ενσωματώνεται με την παρακολούθηση άλλων παθογόνων, τοξικών ενώσεων και δεικτών δημόσιας υγείας, θέτει νέες απαιτήσεις τόσο τεχνικές όσο και θεσμικές. Η εμπειρία από την Ιαπωνία, την Κίνα και την Ευρωπαϊκή Ένωση δείχνει ότι η επιτυχής ενσωμάτωση απαιτεί κατάλληλη κατάρτιση προσωπικού, αναβάθμιση πληροφοριακών συστημάτων και διατομεακή συνεργασία (Nakamura et al. 2015; Girón-Guzmán et al., 2024).

Συμπερασματικά, οι προϋποθέσεις επιτυχίας της περιβαλλοντικής επιτήρησης και οι προκλήσεις εφαρμογής δεν είναι σταθερές, αλλά δυναμικές και αλληλεξαρτώμενες. Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος ES δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον εξοπλισμό ή τις τεχνικές, αλλά από την ενορχήστρωση όλων των επιπέδων λειτουργίας – από το πεδίο ως τη λήψη αποφάσεων. Σε έναν κόσμο όπου η εξάλειψη της πολιομυελίτιδας συνυπάρχει με την πιθανότητα επανεμφάνισης, η ES μετατρέπεται από εργαλείο επιτήρησης σε πυλώνα στρατηγικής ασφάλειας υγείας

3.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ WPV3 ΣΕ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ: ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΗΣ ΟΛΛΑΝΔΙΑΣ

Η Ολλανδία αποτελεί διεθνώς αναγνωρισμένο παράδειγμα ορθής πρακτικής στον τομέα της περιβαλλοντικής επιτήρησης πολιοιού, λόγω της συστηματικής και τεχνικά προηγμένης εφαρμογής μεθόδων ανίχνευσης σε κρίσιμες εγκαταστάσεις. Αν και η χώρα έχει ανακηρυχθεί «πολιο-ελεύθερη» από το 1992, φιλοξενεί εγκαταστάσεις χειρισμού ζωντανών πολιοϊών για ερευνητικούς και παραγωγικούς σκοπούς (Poliovirus Essential Facilities – PEFs), οι οποίες εντάσσονται στο παγκόσμιο δίκτυο υπό την επίβλεψη του ΠΟΥ (WHO, 2021). Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας, εφαρμόζεται ένα από τα πιο πυκνά και λειτουργικά δίκτυα περιβαλλοντικής επιτήρησης στην Ευρώπη, με αυστηρή παρακολούθηση στρατηγικών σημείων και υψηλού επιπέδου εργαστηριακή ανάλυση.

Τον Νοέμβριο του 2022, στο πλαίσιο της τακτικής επιτήρησης υγρών αποβλήτων από εγκατάσταση PEF, ανιχνεύθηκε άγριος πολιοϊός τύπου 3 (WPV3) σε δείγμα υγρών αποβλήτων. Το στέλεχος ταυτοποιήθηκε μέσω μοριακής ανάλυσης ως πλήρως νευροπαθογόνος WPV3, με γενετική αλληλουχία συμβατή με στελέχη που χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακές διαδικασίες εντός της εγκατάστασης (Duizer et al., 2023). Η πηγή του ιού αποδόθηκε σε υπάλληλο που χειριζόταν το στέλεχος WPV3 στο πλαίσιο εγκεκριμένων δραστηριοτήτων. Αν και το άτομο παρέμεινε ασυμπτωματικό, η ανάλυση έδειξε απέκκριση ιικού RNA στα κόπρανα για αρκετές εβδομάδες μετά την έκθεση (Duizer et al., 2023).

Το συμβάν χαρακτηρίστηκε ως ακούσια ενδοεργαστηριακή αποδέσμευση WPV3, χωρίς περαιτέρω διασπορά στον περιβάλλοντα πληθυσμό. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κινδύνου που συνεπάγεται η παρουσία ζωντανού πολιοϊού σε ανοιχτό αποχετευτικό δίκτυο, κινητοποιήθηκαν άμεσα μηχανισμοί αντίδρασης. Πραγματοποιήθηκε γεωγραφική ιχνηλάτηση της περιοχής αποχέτευσης, ενίσχυση της δειγματοληψίας σε περισσότερα από 20 σημεία και μοριακή επιβεβαίωση της μοναδικότητας του στελέχους (Duizer et al., 2023). Κανένα από τα επακόλουθα δείγματα δεν κατέδειξε παρουσία WPV3, γεγονός που τεκμηριώνει την αποτελεσματικότητα των μέτρων πρόληψης και την έγκαιρη λειτουργία της επιτήρησης.

Το περιστατικό ανέδειξε τη σημαντικότητα της συμμόρφωσης με τις αρχές του Global Action Plan IV (GAPIV), το οποίο προβλέπει αυστηρούς όρους λειτουργίας για τις PEFs, συμπεριλαμβανομένων των περιοδικών ασκήσεων βιοασφάλειας, της υποχρεωτικής κοινοποίησης περιστατικών και της συνεχούς επιτήρησης εκροών (WHO, 2021; WHO, 2023). Η ολλανδική αρχή δημόσιας υγείας δημοσιοποίησε το περιστατικό άμεσα στην Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Πληροφοριών για την Πολιομυελίτιδα (EPIS), επιτρέποντας την ενημέρωση όλων των εμπλεκόμενων εθνικών και διεθνών οργανισμών (Duizer et al., 2023). Η εν λόγω διαφάνεια αποτέλεσε υπόδειγμα υπεύθυνης διαχείρισης βιολογικού κινδύνου και ενίσχυσε την εμπιστοσύνη στη λειτουργία του διεθνούς δικτύου GPEI.

Η τεχνική ανάλυση του δείγματος βασίστηκε σε προηγμένες μοριακές τεχνικές, όπως η RT-qPCR και η ψηφιακή PCR (dPCR), ενώ αξιοποιήθηκαν παράλληλα και καλλιεργητικές μέθοδοι για την ανίχνευση και την ποσοτική εκτίμηση της συγκέντρωσης ιού (Girón-Guzmán et al., 2024). Η χρήση πολλαπλών τεχνικών επιτρέπει όχι μόνο τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων αλλά και την ασφαλή διάκριση μεταξύ WPV, VDPV και Sabin-like στελεχών. Η ενσωμάτωση γενετικής αλληλούχισης (NGS) δίνει τη δυνατότητα πλήρους γονοτυπικής ανάλυσης, ενισχύοντας την ιχνηλάτηση της προέλευσης του ιού και την ταχεία καταγραφή της εξάπλωσής του, εάν υπάρξει.

Το γεγονός ότι ο ιός ανιχνεύθηκε αποκλειστικά μέσω ES, χωρίς αναφορά κλινικών περιστατικών, επιβεβαιώνει την εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία του συστήματος. Η αποκλειστικά προληπτική λειτουργία της επιτήρησης είναι καθοριστική για την

πρόληψη κρίσεων βιοασφάλειας, ιδίως σε πλαίσια όπου η χρήση WPV παραμένει αναγκαία για λόγους εμβολιασμού ή ερευνητικών σκοπών. Σύμφωνα με τον ΠΟΥ, ακόμη και μία μόνο διαρροή στελέχους WPV από PEF μπορεί να οδηγήσει σε επανεμφάνιση της πολιομυελίτιδας σε μη ανοσοποιημένο πληθυσμό, γεγονός που καθιστά τη συνεχή ES υποχρεωτική συνιστώσα κάθε στρατηγικής containment (WHO, 2023).

Η Ολλανδία, στο πλαίσιο της συμμόρφωσης με τις οδηγίες του GAPIV, διατηρεί σύστημα δειγματοληψίας που καλύπτει όχι μόνο τις εγκαταστάσεις PEFs αλλά και τα σημεία απορροής αστικών και ημιαστικών περιοχών. Η στρατηγική αυτή επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση πιθανών διασπορών και εντοπισμό ακόμη και ελάχιστης παρουσίας ιικού RNA, πριν αυτό αποκτήσει επιδημιολογική σημασία. Η ύπαρξη ενός τέτοιου συστήματος δεν θεωρείται πλεονάζουσα αλλά απολύτως αναγκαία, δεδομένης της εξαιρετικά μεταδοτικής φύσης του πολιοϊού και της δυνατότητας κυκλοφορίας του χωρίς κλινική εκδήλωση για εβδομάδες (Klapsa et al., 2022).

Σε ευρύτερο πλαίσιο, το περιστατικό του WPV3 στην Ολλανδία ανέδειξε τη σημασία της ενσωμάτωσης της ES στο δίκτυο παγκόσμιας βιοασφάλειας. Η έγκαιρη κοινοποίηση, η τεχνική επάρκεια, η θεσμική διαφάνεια και η προσαρμοστική ικανότητα των αρχών υγείας αποτελούν θεμέλια για την παγκόσμια πρόληψη επανεμφάνισης του πολιοϊού. Η GPEI και ο ΠΟΥ επαναβεβαίωσαν μετά το περιστατικό την ανάγκη για αυστηρή παρακολούθηση των PEFs και την ενίσχυση των ES σε όλες τις χώρες που είτε χρησιμοποιούν OPV είτε διατηρούν ερευνητική δραστηριότητα με ζωντανά στελέχη (WHO, 2023).

Συμπερασματικά, η περίπτωση της Ολλανδίας αποδεικνύει ότι ακόμη και ένα υψηλού επιπέδου εθνικό σύστημα υγείας δεν είναι άτρωτο απέναντι σε ακούσια συμβάντα διαρροής πολιοϊού. Η παρουσία και ενεργοποίηση ενός αποτελεσματικού συστήματος ES λειτούργησε ως «τελευταία γραμμή άμυνας», αποτρέποντας ενδεχόμενη κρίση δημόσιας υγείας. Η συγκεκριμένη εμπειρία παρέχει ισχυρά επιχειρήματα για την καθολική ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής επιτήρησης στα πρωτόκολλα εργαστηριακής διαχείρισης παθογόνων και καταδεικνύει την ανάγκη για συνεχείς επενδύσεις στη βιοασφάλεια, την τεχνική ικανότητα και τη διεθνή συνεργασία. Στην παγκόσμια προσπάθεια εξάλειψης της πολιομυελίτιδας, η Ολλανδία προσφέρει ένα πρότυπο εφαρμογής του containment στην πράξη.

3.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΑΝΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Η παγκόσμια εφαρμογή της περιβαλλοντικής επιτήρησης (Environmental Surveillance – ES) για την ανίχνευση του πολιοϊού παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις σε επίπεδο οργάνωσης, τεχνικής εφαρμογής, αποτελεσματικότητας και θεσμικής ενσωμάτωσης, ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Η ποικιλομορφία αυτή οφείλεται τόσο σε υλικοτεχνικές και οικονομικές διαφορές όσο και σε παράγοντες όπως η

εμβολιαστική κάλυψη, το ιστορικό κυκλοφορίας του ιού, η ύπαρξη PEFs, η διαθεσιμότητα εργαστηριακών υποδομών και η πολιτική δέσμευση για δημόσια υγεία (WHO, 2023· Girón-Guzmán et al., 2024).

Στην Ευρώπη, η ES εφαρμόζεται κυρίως ως εργαλείο πρόληψης έναντι εργαστηριακών διαρροών ή επανεισαγωγής του ιού μέσω ταξιδιών και μετακινήσεων. Στην Ολλανδία, το σύστημα ES είναι ενσωματωμένο στην εθνική στρατηγική βιοασφάλειας και καλύπτει τόσο τις εγκαταστάσεις PEFs όσο και τα πληθυσμιακά κέντρα με εκτεταμένο δίκτυο δειγματοληψίας, ενώ το περιστατικό ανίχνευσης WPV3 το 2022 επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητα του συστήματος (Duizer et al., 2023). Στην Πολωνία και τη Γαλλική Γουιάνα, η ES εντόπισε cVDPV2 και cVDPV3 αντίστοιχα σε υγρά απόβλητα το 2023, χωρίς παρουσία κλινικών περιστατικών, γεγονός που ενεργοποίησε έκτακτα μέτρα ελέγχου (Toro et al., 2024; Duizer et al., 2023). Το Ηνωμένο Βασίλειο, μέσω του UKHSA, εφαρμόζει συνδυασμένο σύστημα ES και επιτήρησης AFP με ψηφιοποίηση της επιδημιολογικής πληροφορίας και στόχευση βάσει κοινωνικοδημογραφικών δεδομένων (Rowland et al., 2025). Η Ευρώπη, παρότι θεωρείται εξάλειψης, παραμένει ενεργή στον τομέα της επιτήρησης λόγω της πολιτικής βούλησης για διατήρηση υψηλού επιπέδου ετοιμότητας.

Στην Αφρική, η ES αποτελεί κρίσιμο εργαλείο πρόωξης προειδοποίησης και πολλές φορές αντικαθιστά ή υπερκαλύπτει την AFP surveillance, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένη προσβασιμότητα. Η Γκάνα αποτελεί υπόδειγμα ορθής εφαρμογής ES, καθώς η ανίχνευση cVDPV2 σε υγρά απόβλητα το 2019 οδήγησε σε άμεση επιβεβαίωση περιστατικού AFP και τρεις γύρους εμβολιασμού (WHO, 2023). Αντίθετα, στο Καμερούν και στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, η εφαρμογή παραμένει αποσπασματική, με επιτήρηση κυρίως μέσω AFP και αδύναμη κάλυψη μέσω υγρών αποβλήτων, γεγονός που συμβάλλει στη διατήρηση της κυκλοφορίας cVDPV2 (Njile et al., 2024; Cooper et al., 2025). Οι δυσκολίες σχετίζονται με την έλλειψη υποδομών, την περιορισμένη εργαστηριακή ικανότητα και την αδυναμία άμεσης ανταπόκρισης.

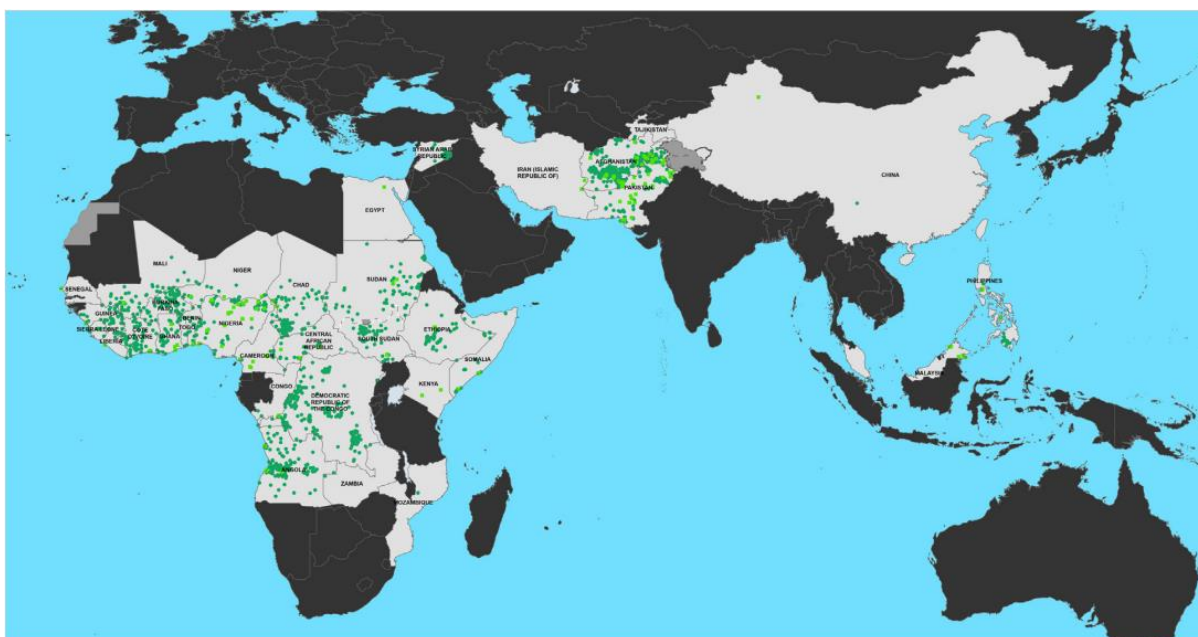
Στην Ασία, παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση. Στο Ισραήλ, η ES είναι πλήρως ενσωματωμένη και εφαρμόζεται με υψηλή ακρίβεια, γεγονός που επιβεβαιώθηκε το 2022 με την ανίχνευση cVDPV3 σε υγρά απόβλητα και ταυτόχρονη εμφάνιση AFP, ακολουθούμενη από στοχευμένες καμπάνιες εμβολιασμού (WHO, 2023). Η Ιαπωνία και η Κίνα έχουν προχωρήσει στην ενσωμάτωση της ES σε συστήματα WBE πολλαπλής χρήσης. Στην Κίνα, το μακροχρόνιο δίκτυο της επαρχίας Φουτζιάν κατέγραψε πλήρη εξαφάνιση του PV2 και μείωση NPEVs μετά την αλλαγή του εμβολιαστικού σχήματος, επιβεβαιώνοντας την ευαισθησία και χρησιμότητα του συστήματος σε πληθυσμιακό επίπεδο (Nakamura et al., 2015). Αντίθετα, σε περιοχές όπως το Αφγανιστάν ή η Υεμένη, η επιτήρηση παραμένει ασθενής λόγω πολιτικής αστάθειας και έλλειψης συντονισμού, αφήνοντας κενά στην παγκόσμια αλυσίδα επιτήρησης.

Στην Αμερική, η εφαρμογή της ES αποκτά νέο δυναμισμό. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η καθυστερημένη ανίχνευση του cVDPV2 στο Rockland County το 2022 αποκάλυψε την ανάγκη ομοσπονδιακού συντονισμού και εναρμόνισης των πολιτειακών πρωτοκόλλων (Baguune et al., 2024). Μετά το περιστατικό, η επιτήρηση ενισχύθηκε σε πέντε κομητείες, καταδεικνύοντας την ανάγκη για σταθερή και προληπτική ES, ιδιαίτερα σε περιοχές με εμβολιαστικά κενά (Kalkowska et al., 2024). Η Βραζιλία, αξιοποιώντας δεδομένα κοινωνικής ευαλωτότητας, υιοθέτησε πολυτροπική επιτήρηση για τον εντοπισμό σιωπηρών εστιών, παρέχοντας πρότυπο στοχευμένης εφαρμογής βασισμένης σε ανάλυση κινδύνου (Girón-Guzmán et al., 2024).

4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ

Συνοψίζοντας, όπως αναφέρθηκε και σε άλλες παραγράφους, η περιβαλλοντική επιτήρηση (Environmental Surveillance - ES) αποτελεί σήμερα έναν από τους πιο κρίσιμους και ευέλικτους μηχανισμούς για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας του πολιοϊού σε παγκόσμια κλίμακα. Η μεθοδολογία αυτή, που βασίζεται στην ανίχνευση γενετικού υλικού του ιού σε υγρά απόβλητα, προσφέρει τη δυνατότητα εποπτείας μεγάλων πληθυσμιακών ομάδων ανεξαρτήτως πρόσβασης στις υπηρεσίες υγείας ή εμφάνισης συμπτωμάτων (WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024). Το βασικό πλεονέκτημα της ES είναι η ικανότητά της να ανιχνεύει τη σιωπηρή κυκλοφορία του πολιοϊού, δηλαδή τη μετάδοση από ασυμπτωματικούς φορείς, η οποία δεν καταγράφεται από την παραδοσιακή επιτήρηση βασισμένη σε περιστατικά οξείας χαλαρής παράλυσης (Acute Flaccid Paralysis - AFP) (Cooper et al., 2025).



Εικόνα 9:Γεωγραφική κατανομή των κρουσμάτων cVDPV2 που εντοπίστηκαν μέσω AFP και θετικών δειγμάτων από περιβαλλοντική επιτήρηση κατά την περίοδο 2016-2020 (Cooper et al., 2025).

Σε αντίθεση με την AFP, η οποία εξαρτάται από την κλινική αναφορά περιστατικών και μπορεί να καθυστερήσει σημαντικά λόγω υποαναφοράς, λανθασμένης διάγνωσης ή γεωγραφικών φραγμών, η ES προσφέρει δυνατότητα διαχρονικής παρακολούθησης ανεξαρτήτως ατομικής διάγνωσης (WHO, 2023). Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιοχές όπου η καταγραφή περιστατικών AFP είναι ανεπαρκής ή όπου το ποσοστό εμβολιαστικής κάλυψης είναι χαμηλό. Η περιβαλλοντική επιτήρηση έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί με συγκριτικά χαμηλό κόστος και χωρίς την ανάγκη εξατομικευμένης συναίνεσης ή κλινικής εμπλοκής, παρέχοντας πληθυσμιακά αντιπροσωπευτικά δεδομένα μέσω της ανάλυσης αστικών υγρών αποβλήτων (Girón-Guzmán et al., 2024; Njile et al., 2024).

Οι περιπτώσεις των Ηνωμένων Πολιτειών και του Ηνωμένου Βασιλείου αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της αποτελεσματικότητας της ES ως πρώιμου συστήματος ανίχνευσης. Το 2022, στην κομητεία Rockland της Νέας Υόρκης, ανιχνεύθηκε cVDPV2 σε δείγματα υγρών αποβλήτων αρκετές εβδομάδες πριν την εμφάνιση του πρώτου παραλυτικού περιστατικού, αποδεικνύοντας την ικανότητα της ES να λειτουργεί ως προγνωστικός μηχανισμός (Baguune et al., 2024; Kalkowska et al., 2024) (ΕΙΚΟΝΑ 8). Αντίστοιχα, στο Λονδίνο εντοπίστηκε συνεχόμενη παρουσία cVDPV2 για πάνω από έξι μήνες στα υγρά απόβλητα, χωρίς να αναφερθεί κανένα κλινικό περιστατικό AFP, γεγονός που τεκμηριώνει τη δυνατότητα της ES να αναγνωρίζει εστίες σιωπηρής κυκλοφορίας σε αστικά περιβάλλοντα (Rowland et al., 2025).

Η αποτελεσματικότητα της περιβαλλοντικής επιτήρησης αποδεικνύεται ακόμη πιο κρίσιμη σε χώρες με ελλιπή κλινική παρακολούθηση και περιορισμένη πρόσβαση σε υπηρεσίες υγείας. Στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, η χρήση της ES περιορίστηκε κυρίως σε μεγάλα αστικά κέντρα, αλλά αποτέλεσε τον μοναδικό αξιόπιστο μηχανισμό εντοπισμού της κυκλοφορίας του cVDPV2, σε συνθήκες όπου η AFP surveillance κατέγραφε σημαντικά κενά, τόσο λόγω γεωγραφικής απομόνωσης όσο και εξαιτίας κοινωνικοπολιτικών παραγόντων (Cooper et al., 2025). Αντίστοιχα, στο Καμερούν, ενώ η ES δεν είχε ακόμα πλήρως ενσωματωθεί στο εθνικό σύστημα υγείας, ανάλυση δειγμάτων υγρών αποβλήτων αποκάλυψε την παρουσία εντεροϊών σε περιοχές όπου δεν είχε προηγουμένως καταγραφεί κλινική δραστηριότητα, επιβεβαιώνοντας την προστιθέμενη αξία της περιβαλλοντικής παρακολούθησης ως ανεξάρτητου δείκτη επιδημιολογικού κινδύνου (Njile et al., 2024).

Η περίπτωση της Ολλανδίας, η οποία διαθέτει από τα πιο ανεπτυγμένα και τεχνικά αξιόπιστα δίκτυα ES, αναδεικνύει την ικανότητα της επιτήρησης να εντοπίζει ακόμα και περιστατικά ακούσιας αποδέσμευσης του ιού από εργαστηριακές πηγές. Το 2022, ανιχνεύθηκε WPV3 σε υγρά απόβλητα γύρω από PEF, χωρίς να καταγραφεί καμία κλινική εκδήλωση, αποδεικνύοντας την ικανότητα της ES να παρέχει πληροφορίες ακόμη και σε καταστάσεις που δεν σχετίζονται με την κλασική μετάδοση (Duizer et al., 2023). Η έγκαιρη ειδοποίηση των αρχών οδήγησε σε στοχευμένα μέτρα περιορισμού και τελικά στην αποτροπή κάθε πιθανής διασποράς του ιού.

Επιπλέον, η ES έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτική σε περιβάλλοντα ημίκλειστων πληθυσμών, όπου η παραδοσιακή επιδημιολογική επιτήρηση είναι δύσκολη ή χρονοβόρα. Σε δομές όπως στρατόπεδα, σχολεία, φυλακές ή οικιστικά συγκροτήματα, η επιτήρηση μέσω υγρών αποβλήτων επιτρέπει την άμεση και μη παρεμβατική ανίχνευση παρουσίας πολιοϊού σε επίπεδο μικροκοινότητας (Girón-Guzmán et al., 2024). Με την κατάλληλη χωρική ανάλυση, μπορεί να εντοπιστεί η ύπαρξη φορέων σε πρώιμο στάδιο, πριν προκύψουν κλινικά περιστατικά ή μαζικές εστίες μετάδοσης. Η εφαρμογή της ES στις παραπάνω περιπτώσεις αναδεικνύει την υψηλή της ευαισθησία, τη δυνατότητα πρόβλεψης και την προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά επιδημιολογικά και κοινωνικά περιβάλλοντα. Τα παραδείγματα αυτά επιβεβαιώνουν την ανάγκη διατήρησης της ES όχι μόνο ως εργαλείο συμπληρωματικό στην AFP, αλλά ως αυτόνομο σύστημα επιτήρησης με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και δυναμική.

Η ποσοτική δυναμική της περιβαλλοντικής επιτήρησης συνιστά έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς που επιβεβαιώνουν τη χρησιμότητά της για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κυκλοφορίας του πολιοϊού. Πλήθος μελετών έχει δείξει ότι η συγκέντρωση ιικού RNA στα υγρά απόβλητα μπορεί να συσχετιστεί αξιόπιστα με την έκταση της κυκλοφορίας του ιού στον πληθυσμό, ακόμη και σε στάδια προκλινικής μετάδοσης (Girón-Guzmán et al., 2024). Η δυνατότητα αυτή καθιστά την ES πολύτιμο εργαλείο πρόγνωσης και δυναμικής εκτίμησης επιδημιολογικών τάσεων, ιδιαίτερα σε πληθυσμούς με περιορισμένη πρόσβαση σε διαγνωστικές εξετάσεις ή σε καταστάσεις όπου η επιδημία ενδέχεται να εξελίσσεται σιωπηρά.

Η αποτελεσματικότητα της προσέγγισης ενισχύεται περαιτέρω με τη χρήση εσωτερικών φυσιολογικών δεικτών, όπως ο Pepper Mild Mottle Virus (PMMoV), ένας σταθερός δείκτης παρουσίας ανθρώπινων κοπράνων στα υγρά απόβλητα. Ο PMMoV χρησιμοποιείται για την ομαλοποίηση της συγκέντρωσης RNA παθογόνων, επιτρέποντας συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών σημείων δειγματοληψίας ή χρονικών περιόδων (WHO, 2023). Η αξιοποίηση τέτοιων παραμέτρων προσφέρει υψηλής αξιοπιστίας δεδομένα για τη διαχρονική παρακολούθηση της ενδημικότητας και την εκτίμηση του εύρους κυκλοφορίας του πολιοϊού σε διαφορετικά πληθυσμιακά σύνολα.

Η αποτελεσματικότητα της ES ως εργαλείου δημόσιας υγείας ενισχύθηκε καθοριστικά κατά την πανδημία COVID-19. Η επιτυχημένη εφαρμογή της για την επιτήρηση του SARS-CoV-2 ενίσχυσε τη θεσμική και κοινωνική αποδοχή της μεθόδου, ενώ δημιούργησε τεχνικές και οργανωτικές υποδομές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παρακολούθηση του πολιοϊού. Η δυνατότητα επαναστόχευσης εργαστηριακών πόρων, η αξιοποίηση ενιαίων δικτύων μεταφοράς και η σύγκλιση πρωτοκόλλων ανάλυσης διαμόρφωσαν ένα νέο λειτουργικό πρότυπο που καθιστά την ES εργαλείο πολλαπλών χρήσεων στη στρατηγική της δημόσιας υγείας. Παράλληλα, οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η χρήση ψηφιακής PCR και αλληλούχισης νέας γενιάς (NGS), ενισχύουν περαιτέρω την ευαισθησία της επιτήρησης και επιτρέπουν την ιχνηλάτηση της γενετικής ταυτότητας του κυκλοφορούντος ιού, με δυνατότητα διάκρισης μεταξύ WPV, VDPV και Sabin-like στελεχών (. Αυτή η υψηλής διακριτικής ικανότητας τεχνική προσδίδει στην ES τη δυνατότητα υποστήριξης αποφάσεων δημόσιας υγείας σε πραγματικό χρόνο (Takahashi et al., 2023).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της περιβαλλοντικής επιτήρησης, η αξιοπιστία και η χρησιμότητά της εξαρτώνται από την ικανοποίηση συγκεκριμένων τεχνικών, λειτουργικών και θεσμικών προϋποθέσεων. Η ποιότητα των δειγμάτων, η σταθερότητα της θερμοκρασίας κατά τη μεταφορά, η συχνότητα της δειγματοληψίας και η επιλογή κατάλληλων σημείων συλλογής είναι καθοριστικοί παράγοντες για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024). Επιπλέον, η τεχνογνωσία και η επάρκεια του εργαστηριακού προσωπικού, η ικανότητα ανίχνευσης χαμηλών συγκεντρώσεων RNA και η ταχύτητα ανάλυσης αποτελεσμάτων επηρεάζουν άμεσα την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα της ES και τη δυνατότητα έγκαιρης απόκρισης.

Η εφαρμογή κοινών διεθνών πρωτοκόλλων και η διασφάλιση της συγκρισιμότητας των δεδομένων μεταξύ χωρών και περιφερειών αποτελεί βασική ανάγκη. Η έλλειψη εναρμονισμένων προτύπων μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς συγκρίσεις και σε διακυβεύσεις της παγκόσμιας επιτήρησης. Πρωτοβουλίες όπως το GLOWACON και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα EU-WISH, σε συνεργασία με τον ΠΟΥ και το ECDC, έχουν ως στόχο την υιοθέτηση ενιαίων μεθοδολογιών, την ενίσχυση της διαλειτουργικότητας των πληροφοριακών συστημάτων και την προτυποποίηση των βημάτων από τη δειγματοληψία έως την κοινοποίηση των δεδομένων (WHO, 2023).

Η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της ES εξαρτάται και από τη θεσμική της ενσωμάτωση ως σταθερού μηχανισμού δημόσιας υγείας και όχι ως προσωρινής ή πειραματικής πρακτικής. Απαιτείται πολιτική βούληση για την παροχή σταθερής χρηματοδότησης, τη θεσμοθέτηση της ES στα υγειονομικά πρωτόκολλα, την κατάρτιση του προσωπικού και την εναρμόνιση με το ρυθμιστικό πλαίσιο της βιοασφάλειας και της διαχείρισης δεδομένων (Girón-Guzmán et al., 2024). Σε αυτό το πλαίσιο, η προσέγγιση One Health, που προτείνει τη συστημική σύνδεση της ανθρώπινης, ζωικής και περιβαλλοντικής υγείας, παρέχει τη στρατηγική βάση για την ενσωμάτωση της ES σε ένα ολιστικό μοντέλο παρακολούθησης των κινδύνων δημόσιας υγείας (WHO, 2023).

Συμπερασματικά, η περιβαλλοντική επιτήρηση έχει καταστεί ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία της δημόσιας υγείας για την πρόληψη και τον έλεγχο της πολιομυελίτιδας. Η ικανότητά της να ανιχνεύει σιωπηρή κυκλοφορία, να εκτιμά την ποσοτική δυναμική της μετάδοσης και να εντοπίζει πρώιμα περιστατικά ακούσιας ή ασυμπτωματικής διασποράς την καθιστούν αναντικατάστατη. Η επιτυχία της εξαρτάται από τη συνεχή επένδυση, την τεχνολογική αναβάθμιση, τον διεθνή συντονισμό και τη θεσμική εδραίωση. Στο μεταίχμιο της παγκόσμιας εξάλειψης του πολιοϊού, η ES οφείλει να παραμείνει βασικό εργαλείο επιτήρησης, πρόληψης και ασφάλειας της δημόσιας υγείας.

4.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ, ΘΕΣΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Παρά τα σημαντικά επιτεύγματα της περιβαλλοντικής επιτήρησης (Environmental Surveillance – ES) στην έγκαιρη ανίχνευση του πολιοϊού και την ενίσχυση της επιδημιολογικής παρακολούθησης, η εφαρμογή της εξακολουθεί να συνοδεύεται από σύνθετες προκλήσεις. Οι δυσκολίες αυτές δεν είναι μονοδιάστατες αλλά αφορούν τεχνικές, θεσμικές και κοινωνικές παραμέτρους, οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και επηρεάζουν τη βιωσιμότητα, την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων ES (Ross et al., 2022).

Σε τεχνικό επίπεδο, η ποιότητα των δεδομένων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες δειγματοληψίας και ανάλυσης. Παράγοντες όπως η συχνότητα και η γεωγραφική αντιπροσωπευτικότητα της λήψης δειγμάτων, η σταθερότητα του RNA στο περιβάλλον, η παρουσία ανασταλτικών ουσιών στα υγρά απόβλητα και η εποχιακή μεταβλητότητα επηρεάζουν τη δυνατότητα ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης του ιού (WHO, 2023; Njile et al., 2024). Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των αστικών αποχετευτικών δικτύων δημιουργεί ασυμμετρίες στη συγκέντρωση του ιικού φορτίου, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή αραιώση ή ανάμειξη βιομηχανικών αποβλήτων. Η τεχνική ακρίβεια επηρεάζεται και από την απουσία καθολικά αποδεκτών πρωτοκόλλων αναφοράς. Η έλλειψη τυποποιημένων μεθοδολογιών για τη χρήση εσωτερικών δεικτών, όπως ο PMMoV, καθώς και για τη στατιστική κανονικοποίηση των μετρήσεων RNA, περιορίζει τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ εργαστηρίων και κρατών (WHO, 2023). Η ανομοιογένεια αυτή υπονομεύει την αξιοπιστία των δεδομένων και καθιστά δύσκολη τη διεθνή εναρμόνιση της επιτήρησης.

Η αναγκαιότητα εξειδικευμένου προσωπικού και προηγμένου εξοπλισμού αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνικές προκλήσεις. Η εκπαίδευση στο χειρισμό βιολογικών δειγμάτων, στην απομόνωση RNA, και στην εφαρμογή τεχνικών όπως η RT-qPCR, η ψηφιακή PCR και η αλληλούχιση νέας γενιάς (NGS) είναι κρίσιμη, αλλά περιορισμένη σε πολλές χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος (Girón-Guzmán et al., 2024). Αυτή η έλλειψη τεχνογνωσίας δημιουργεί εξάρτηση από εξωτερική τεχνική υποστήριξη και χρηματοδοτούμενα δίκτυα, υπονομεύοντας τη δυνατότητα ανεξάρτητης και διαρκούς επιτήρησης.

Σε θεσμικό επίπεδο, η εφαρμογή της περιβαλλοντικής επιτήρησης συχνά εντάσσεται σε περιβάλλοντα διοικητικής πολυπλοκότητας, όπου οι αρμοδιότητες διαμοιράζονται μεταξύ διαφορετικών οργανισμών και επιπέδων διακυβέρνησης. Η απουσία σαφών καθηκόντων και πρωτοκόλλων συνεργασίας μεταξύ υγειονομικών αρχών, υπηρεσιών ύδρευσης-αποχέτευσης και δημοτικών δομών μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις στην απόκριση, διπλές ενέργειες ή και πλήρη αδράνεια (WHO, 2023). Το πρόβλημα αυτό εντείνεται σε ομοσπονδιακά οργανωμένες χώρες, όπου η ασυνεπής εφαρμογή πολιτικών μεταξύ κρατιδίων ή επαρχιών δυσχεραίνει τον συντονισμό, όπως φάνηκε στην περίπτωση των ΗΠΑ το 2022, όπου ανιχνεύθηκε cVDPV2 σε πέντε κομητείες με διαφορετικά επίπεδα αντίδρασης (Kalkowska et al., 2024).

Η έλλειψη θεσμοθετημένων διαύλων επικοινωνίας και υποχρεωτικής κοινοποίησης των αποτελεσμάτων της ES καθιστά δύσκολη τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Σε πολλές χώρες δεν υπάρχει νομικό πλαίσιο που να προβλέπει υποχρεωτική ειδοποίηση των αρμόδιων αρχών για ανίχνευση πολιοϊού στα υγρά απόβλητα, με αποτέλεσμα τα δεδομένα να παραμένουν αδρανή ή να μην αξιοποιούνται έγκαιρα (WHO, 2023). Η απουσία εθνικών στρατηγικών που να περιλαμβάνουν την ES ως θεσμικά κατοχυρωμένο μέσο επιτήρησης συντελεί στην υποβάθμισή της σε συμπληρωματική ή δευτερεύουσα πρακτική, παρότι έχει αποδεδειγμένη προγνωστική αξία.

Η χρηματοδότηση της ES παραμένει συχνά εξαρτημένη από διεθνείς οργανισμούς, όπως ο ΠΟΥ και το GPEI, χωρίς εγγυημένη ενσωμάτωση στον κρατικό προϋπολογισμό. Αυτό δημιουργεί συνθήκες θεσμικής αστάθειας και κινδύνου διακοπής των προγραμμάτων μόλις λήξει η εξωτερική υποστήριξη. Η περίπτωση της Αιγύπτου, όπου η ES ενισχύθηκε μέσω εξωτερικών χρηματοδοτήσεων την περίοδο 2020–2021, αλλά δεν θεσμοθετήθηκε ως πάγια πρακτική, αποτελεί ενδεικτικό παράδειγμα αυτού του φαινομένου (Shabana et al., 2024). Αντίθετα, η Ολλανδία έχει θεσμοθετήσει πλήρως την ES γύρω από τις εγκαταστάσεις PEFs, εφαρμόζοντας υποχρεωτικά πρωτόκολλα που συνδέονται με την άδεια λειτουργίας των μονάδων (Duizer, 2023). Η θεσμική ενσωμάτωση της ES απαιτεί μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, πολιτική δέσμευση και δημιουργία ενός κεντρικού μηχανισμού διακυβέρνησης με δυνατότητα εποπτείας, επεξεργασίας και διαβίβασης των δεδομένων επιτήρησης προς όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Η έλλειψη τέτοιου μηχανισμού σε πολλές χώρες οδηγεί σε κατακερματισμό της πληροφορίας και υποβάθμιση της επιχειρησιακής αξίας της επιτήρησης, ειδικά σε καταστάσεις κρίσης.

Οι κοινωνικές προκλήσεις αποτελούν συχνά έναν από τους πλέον υποτιμημένους αλλά κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία ή την αποτυχία της περιβαλλοντικής επιτήρησης. Η αποτελεσματικότητα της ES εξαρτάται όχι μόνο από την τεχνική εφαρμογή και τη θεσμική ενσωμάτωσή της, αλλά και από την κοινωνική αποδοχή της πρακτικής από τις τοπικές κοινότητες. Σε πολλές περιπτώσεις, παρατηρείται έλλειψη κατανόησης της λειτουργίας και των στόχων της ES, γεγονός που οδηγεί σε επιφυλακτικότητα, καχυποψία ή και ανοιχτή αντίδραση, ιδίως σε πληθυσμούς που ιστορικά έχουν βιώσει παραμέληση ή διακρίσεις από τις αρχές υγείας (Girón-Guzmán et al., 2024). Η συλλογή υγρών αποβλήτων μπορεί να εκληφθεί από ορισμένες κοινότητες ως παραβίαση της ιδιωτικότητας ή ως μέσο επιτήρησης χωρίς συναίνεση. Το πρόβλημα εντείνεται όταν η επιτήρηση αφορά πληθυσμούς σε κοινωνικά ευάλωτες περιοχές, θρησκευτικές μειονότητες ή ομάδες με ιστορικό ελλιπούς ενημέρωσης ή εμπιστοσύνης προς τις κρατικές δομές. Παρόμοιες αντιδράσεις παρατηρήθηκαν σε περιοχές της Βόρειας Νιγηρίας και του Πακιστάν, όπου ο φόβος για κυβερνητική παρέμβαση μέσω προγραμμάτων επιτήρησης και εμβολιασμού έχει οδηγήσει σε αποκλεισμό υγειονομικού προσωπικού από ορισμένες κοινότητες (WHO, 2023).

Η περιορισμένη κοινωνική αποδοχή μπορεί να έχει πρακτικές συνέπειες για τη λειτουργία της ES, όπως μειωμένη πρόσβαση σε σημεία δειγματοληψίας, παρεμπόδιση της εγκατάστασης εξοπλισμού, ή ακόμα και αλλοίωση των δειγμάτων λόγω βανδαλισμών. Για την αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων, είναι απαραίτητη η ενεργός εμπλοκή της κοινότητας στην υλοποίηση των προγραμμάτων επιτήρησης. Η συμμετοχική προσέγγιση, που περιλαμβάνει τη συνεργασία με τοπικούς ηγέτες, την παροχή διαφανών πληροφοριών και τη διαρκή ενημέρωση σχετικά με τους στόχους και τα οφέλη της ES, έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην αύξηση της εμπιστοσύνης και της συμμόρφωσης των τοπικών πληθυσμών (Girón-Guzmán et al., 2024). Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η πολιτισμική προσαρμογή της επικοινωνίας κινδύνου. Η χρήση της κατάλληλης γλώσσας, η απλοποίηση της τεχνικής ορολογίας και η ενσωμάτωση εννοιών που ανταποκρίνονται στις αξίες και τις αντιλήψεις της κάθε κοινότητας είναι θεμελιώδεις παράγοντες επιτυχίας. Οι στρατηγικές αυτές είναι ακόμα πιο κρίσιμες όταν η ES συνδέεται με τη διαχείριση κρίσεων ή την πρόληψη επιδημιών, οπότε η άμεση αποδοχή των παρεμβάσεων μπορεί να καθορίσει την έκβασή τους.

Επιπλέον, η κοινωνική αποδοχή επηρεάζεται και από το ευρύτερο πολιτικό και θεσμικό περιβάλλον. Σε κράτη με χαμηλά επίπεδα εμπιστοσύνης στους θεσμούς, η επιτήρηση –ακόμα και όταν γίνεται με επιστημονικά και υγειονομικά κριτήρια– μπορεί να εκληφθεί ως μέσο ελέγχου ή επιβολής. Για τον λόγο αυτό, είναι κρίσιμο η ES να συνοδεύεται από εγγυήσεις διαφάνειας, σαφείς μηχανισμούς λογοδοσίας και συμμετοχικές διαδικασίες διακυβέρνησης. Η αντιμετώπιση των τεχνικών, θεσμικών και κοινωνικών προκλήσεων που σχετίζονται με την περιβαλλοντική επιτήρηση απαιτεί μια ολιστική και διατομεακή προσέγγιση. Η πολυπλοκότητα της εφαρμογής της ES υπερβαίνει τα όρια της δημόσιας υγείας και εμπλέκει τομείς όπως η διαχείριση υδάτων, η τοπική αυτοδιοίκηση, η εκπαίδευση, η επικοινωνία κινδύνου και η διεθνής συνεργασία. Μόνο μέσω συνεργασίας μεταξύ αυτών των πεδίων μπορεί να

διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και η λειτουργική αξιοπιστία της επιτήρησης.

Η προσέγγιση One Health προσφέρει ένα κατάλληλο πλαίσιο ενσωμάτωσης της ES σε ένα ευρύτερο σύστημα πρόληψης και διαχείρισης κινδύνων, συνδέοντας την ανθρώπινη, ζωική και περιβαλλοντική υγεία σε μια ενιαία στρατηγική δράσης. Η ανάπτυξη εργαλείων μοντελοποίησης κινδύνου, η χρήση γεωχωρικών δεδομένων, οι δείκτες ευαλωτότητας και οι κοινωνικές μεταβλητές μπορούν να συνδυαστούν με τα δεδομένα της ES για την πρόβλεψη επιδημιών και την στοχοθετημένη παρέμβαση (WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024). Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη προτύπων λειτουργίας, η επένδυση στην εκπαίδευση και η θεσμική ενσωμάτωση της ES στα εθνικά προγράμματα πρόληψης αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για την αποφυγή λειτουργικών ασυνέχειας και εξάρτησης από εξωτερικές πηγές. Οι εμπειρίες από χώρες όπως η Ολλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο και το Ισραήλ αποδεικνύουν ότι η πολιτική δέσμευση, η καθολική συμμετοχή των θεσμών και η κοινωνική συναίνεση μπορούν να μετατρέψουν την περιβαλλοντική επιτήρηση από τεχνική πρόκληση σε στρατηγικό πλεονέκτημα.

Συμπερασματικά, οι προκλήσεις εφαρμογής της ES δεν είναι ανυπέρβλητες, αλλά απαιτούν προληπτικό σχεδιασμό, συνέργειες και συνέπεια. Η επιτυχής εφαρμογή της περιβαλλοντικής επιτήρησης προϋποθέτει τεχνική επάρκεια, θεσμική ενσωμάτωση, κοινωνική αποδοχή και διεθνή συνεργασία. Η επένδυση σε αυτούς τους τέσσερις άξονες αποτελεί μονόδρομο για τη διασφάλιση της παγκόσμιας υγειονομικής ασφάλειας και την αποτροπή επανεμφάνισης ασθενειών που θεωρούνται υπό έλεγχο, όπως η πολιομυελίτιδα.

4.3 ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΛΗΨΗ ΕΠΙΔΗΜΙΩΝ

Η περιβαλλοντική επιτήρηση (Environmental Surveillance – ES), όπως έχει ειπωθεί, αποτελεί πλέον αναπόσπαστο τμήμα της παγκόσμιας στρατηγικής για την πρόληψη και τον έλεγχο επιδημιών, προσφέροντας μοναδικά πλεονεκτήματα στην παρακολούθηση παθογόνων με εν δυνάμει επιδημική ή πανδημική δυναμική, όπως ο πολιοϊός. Η ικανότητά της να ανιχνεύει σιωπηρή κυκλοφορία του ιού σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να απαιτείται η εμφάνιση κλινικών περιστατικών, προσδίδει σε αυτήν τη μέθοδο υψηλή επιδημιολογική αξία (WHO, 2023; Girón-Guzmán et al., 2024). Ειδικά στο πλαίσιο της εξάλειψης του πολιοϊού, η ES λειτουργεί ως ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης που ενισχύει την ετοιμότητα των υγειονομικών αρχών και προλαμβάνει επιδημικές εξάρσεις.

Η εφαρμογή της ES συνεισφέρει καθοριστικά στην ενίσχυση της δημόσιας υγείας μέσω της παροχής δεδομένων που δεν περιορίζονται μόνο στην παρουσία ή απουσία του ιού, αλλά επεκτείνονται σε πληροφορίες για τη γεωγραφική εξάπλωση, τη διάρκεια της κυκλοφορίας και τη γενετική ταυτότητα των στελεχών. Η δυνατότητα ανίχνευσης ακόμα και μικρής συγκέντρωσης RNA του πολιοϊού στα υγρά απόβλητα, ιδιαίτερα με τη χρήση τεχνικών όπως η ψηφιακή PCR και η αλληλούχιση νέας γενιάς (NGS),

παρέχει έγκαιρα και ακριβή δεδομένα που μπορούν να καθοδηγήσουν παρεμβάσεις υψηλής ακρίβειας (Girón-Guzmán et al., 2024). Η έγκαιρη ανίχνευση του cVDPV2 στη Νέα Υόρκη και στο Λονδίνο το 2022 κατέδειξε τη δυνατότητα της ES να προλαμβάνει πλήρως κλινικά εμφανείς επιδημίες, όταν η αντίδραση είναι γρήγορη και συντονισμένη (Baguune et al., 2024; Rowland et al., 2025).

Η συμβολή της ES ενισχύεται σημαντικά όταν ενσωματώνεται σε συστήματα πολυπαραμετρικής παρακολούθησης, όπως το wastewater-based epidemiology (WBE), το οποίο χρησιμοποιείται ήδη για την επιτήρηση άλλων παθογόνων όπως ο SARS-CoV-2, οι ιοί της ηπατίτιδας και οι μη πολιοϊκοί εντεροϊοί. Το παράδειγμα της Ιαπωνίας και της Κίνας, όπου η ES ενσωματώνεται σε εθνικά WBE δίκτυα με σκοπό τη συνολική επιτήρηση πληθυσμιακής υγείας, υποδεικνύει τη διευρυμένη χρησιμότητα της μεθόδου (Nakamura et al., 2015). Αυτή η διεπιστημονική προσέγγιση, εναρμονισμένη με τη φιλοσοφία της «One Health», επιτρέπει την ταυτόχρονη παρακολούθηση κινδύνων από διάφορους παθογόνους παράγοντες, καθώς και τη συσχέτιση με περιβαλλοντικούς και κοινωνικοοικονομικούς δείκτες (WHO, 2023).

Επιπρόσθετα, η ES παρέχει πολύτιμα δεδομένα για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των υγειονομικών παρεμβάσεων. Η συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων ιικού RNA στα υγρά απόβλητα και της έκτασης της εμβολιαστικής κάλυψης επιτρέπει την εκτίμηση της ανοσιακής κατάστασης του πληθυσμού σε τοπικό επίπεδο. Μελέτες σε χώρες όπως η Γκάνα και η Βραζιλία απέδειξαν ότι η επιτήρηση υγρών αποβλήτων μπορεί να προβλέψει εστίες με υψηλό επιδημιολογικό κίνδυνο, επιτρέποντας στοχευμένες καμπάνιες εμβολιασμού και κατανομή των πόρων σύμφωνα με τις πραγματικές ανάγκες (Hovi et al., 2012; Girón-Guzmán et al., 2024).

Η δυνατότητα αξιοποίησης των δεδομένων της ES για την πρόληψη επιδημιών δεν περιορίζεται στον πολιοϊό. Το 2022, περιστατικά πρώιμης ανίχνευσης ιών της ηπατίτιδας Α και Ε μέσω λυμάτων στη Γαλλική Γουιάνα και τη Σουηδία κατέδειξαν την προγνωστική ικανότητα της μεθόδου και για άλλες υγειονομικές απειλές (Toro et al., 2024; Wiczorek et al. 2025). Επιπλέον, το ευρωπαϊκό πρόγραμμα GLOWACON προωθεί την καθολική εφαρμογή της ES ως βασικής συνιστώσας των εθνικών μηχανισμών επιτήρησης για την έγκαιρη πρόβλεψη επιδημικών κινδύνων (WHO, 2023).

Συνολικά, η περιβαλλοντική επιτήρηση δεν συνιστά μόνο εργαλείο παρακολούθησης ενός συγκεκριμένου παθογόνου, αλλά θεμελιώδη πυλώνα για τη διατήρηση της δημόσιας υγείας και την ενίσχυση της παγκόσμιας ετοιμότητας. Ο ρόλος της στην πρόληψη εξάρσεων, στη διατήρηση της υγειονομικής ασφάλειας, στην υποστήριξη των εμβολιαστικών στρατηγικών και στη διεπιστημονική προσέγγιση του κινδύνου την καθιστά τεχνολογικά και επιδημιολογικά αναντικατάστατη. Η μακροπρόθεσμη ενσωμάτωσή της στα εθνικά και διεθνή προγράμματα υγείας αποτελεί πλέον όχι μόνο ανάγκη, αλλά επιτακτική προϋπόθεση για τη διατήρηση της προόδου που έχει επιτευχθεί στον έλεγχο της πολιομυελίτιδας και την αποτροπή της αναζωπύρωσής της.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ ΩΣ ΠΟΛΥΤΙΜΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ

Η περιβαλλοντική επιτήρηση μέσω παρακολούθησης των υγρών αποβλήτων έχει καταστεί ένα εξαιρετικά πολύτιμο εργαλείο Δημόσιας Υγείας τις τελευταίες δεκαετίες. Κατά την πανδημία SARS-CoV-2, η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας του ιού σε επίπεδο κοινότητας, αντικαθιστώντας σε πολλές περιπτώσεις τις απαιτητικές ατομικές διαγνωστικές εξετάσεις. Αντίστοιχα, το 2022, το σύστημα επιτήρησης λυμάτων επέδειξε την αξία του και στην περίπτωση της πολιομυελίτιδας, με την ανίχνευση κυκλοφορίας VDPV2 τόσο στη Νέα Υόρκη όσο και στο Λονδίνο (UK Health Security Agency, 2022). Ειδικά στη Νέα Υόρκη, ο συναγερμός προήλθε από την ανίχνευση ενός κλινικού περιστατικού παραλυτικής πολιομυελίτιδας σε ανεμβολίαστο ενήλικα. Οι εργαστηριακές αναλύσεις υγρών αποβλήτων που ακολούθησαν αποκάλυψαν τη γενετική σύνδεση των στελεχών που απομονώθηκαν με τον ιό του περιστατικού (CDC, 2022). Αντίθετα, στο Ηνωμένο Βασίλειο, η επιτήρηση υγρών αποβλήτων λειτουργούσε ήδη προληπτικά, και ο έγκαιρος εντοπισμός του VDPV2 οδήγησε σε επιτάχυνση εμβολιαστικής εκστρατείας και εντατικοποίηση της επιτήρησης, αποτρέποντας την εμφάνιση παραλυτικών περιστατικών (Klappa et al., 2022).

Η επιτήρηση υγρών αποβλήτων είναι χαμηλού κόστους και παρέχει δεδομένα που συμπληρώνουν την παραδοσιακή επιδημιολογική επιτήρηση. Αντιμετωπίζει περιορισμούς της κλινικής επιτήρησης, όπως η χαμηλή κάλυψη, η καθυστερημένη υποβολή περιστατικών και η ύπαρξη μεγάλου ποσοστού ασυμπτωματικών φορέων. Καθώς πλησιάζουμε στην εξάλειψη του πολιοϊού, οι στρατηγικές που βασίζονται αποκλειστικά στην ανίχνευση παραλυτικών περιστατικών θα καθίστανται λιγότερο αποδοτικές. Η ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής επιτήρησης με σύγχρονες τεχνολογίες για την παρακολούθηση πολλαπλών παθογόνων προσφέρει μια οικονομικά βιώσιμη και διαχρονικά χρήσιμη λύση. Η επιτήρηση υγρών αποβλήτων μπορεί να αξιοποιηθεί και για την έγκαιρη ανίχνευση ζoonοσογόνων παθογόνων, πολλά εκ των οποίων εντοπίζονται αρχικά σε περιοχές με εντατική γεωργική ή κτηνοτροφική δραστηριότητα. Με τη διεύρυνση της ES προς αυτές τις πηγές, ενισχύεται η δυνατότητα πρόληψης μελλοντικών πανδημιών (Xiao and Zhang, 2023). Η προσέγγιση αυτή συνάδει με το πλαίσιο One Health και αναδεικνύει την ανάγκη τυποποίησης πρωτοκόλλων και επένδυσης σε εργαστηριακή ικανότητα για ανίχνευση παθογόνων σε υγρά απόβλητα.

Τα εμβόλια νέας γενιάς, όπως το nOPV2, προσφέρουν μειωμένο κίνδυνο μετατροπής σε VDPV, ενώ η υιοθέτηση τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να ενισχύσει τη στοχευμένη απόκριση σε περιβαλλοντικά δεδομένα (GPEI, 2025). Η εμπλοκή των τοπικών κοινοτήτων, μέσω εκστρατειών ενημέρωσης και συμμετοχικής επιτήρησης, είναι

καθοριστική για τη διατήρηση της εμπιστοσύνης και την αντιμετώπιση παραπληροφόρησης. Η παγκοσμιοποίηση, οι μετακινήσεις πληθυσμών και η κλιματική αλλαγή αυξάνουν την πολυπλοκότητα της πρόκλησης, με φαινόμενα όπως οι πλημμύρες του Πακιστάν το 2022 να αναδεικνύουν τη σύνδεση μεταξύ περιβαλλοντικών κρίσεων και εξάρσεων πολιοιού. Η επένδυση σε υποδομές ύδρευσης και αποχέτευσης, η διατομεακή συνεργασία με διεθνείς οργανισμούς (World Health Organization, UNICEF), και η ενίσχυση της επιτήρησης με τεχνολογίες αιχμής θα καθορίσουν το μέλλον της επιτήρησης και πρόληψης. Η περιβαλλοντική επιτήρηση είναι πλέον αναγνωρισμένη ως στρατηγικό εργαλείο όχι μόνο για τον έλεγχο της πολιομυελίτιδας αλλά και για την πρόληψη μελλοντικών υγειονομικών κρίσεων (GPEI, 2023).

5.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΠΟΛΙΟΪΩΝ

Η μετάδοση του πολιοιού συνδέεται άμεσα με περιβαλλοντικούς παράγοντες, κυρίως μέσω μολυσμένων τροφίμων και νερού. Η αποτελεσματική στρατηγική μείωσης της κυκλοφορίας απαιτεί την εφαρμογή διατομεακών παρεμβάσεων που συνδυάζουν τεχνικές υποδομές, εμβολιασμό, εκπαίδευση και τεχνολογική καινοτομία. Η αναβάθμιση των αποχετευτικών συστημάτων είναι ζωτικής σημασίας, ιδιαίτερα σε αγροτικές και αστικές υποβαθμισμένες περιοχές. Το πρόγραμμα "Swachh Bharat Mission" στην Ινδία (2019) αποτελεί ένα επιτυχημένο παράδειγμα, καθώς η κατασκευή δημόσιων υποδομών υγιεινής συνέβαλε στη μείωση της ρύπανσης των υδάτων και στην ενίσχυση της περιβαλλοντικής ασφάλειας. Παράλληλα, η εφαρμογή αποδοτικών μονάδων επεξεργασίας λυμάτων περιορίζει τη διασπορά παθογόνων και υποστηρίζει τη συνεχή παρακολούθηση μέσω περιβαλλοντικής επιτήρησης.

Η εκπαίδευση των κοινοτήτων και η ευαισθητοποίηση των πολιτών σχετικά με τη σχέση υγιεινής και Δημόσιας Υγείας είναι θεμελιώδους σημασίας (Zhou et al., 2020). Το πρόγραμμα "WASH" της UNICEF στο Νεπάλ επέτυχε δραστική μείωση περιστατικών μόλυνσης, ενισχύοντας την αποδοχή των παρεμβάσεων σε τοπικό επίπεδο. Παρόμοια, η περιβαλλοντική εκπαίδευση στα σχολεία ενισχύει την κατανόηση της σύνδεσης μεταξύ υδάτινων πόρων και νοσημάτων, δημιουργώντας μελλοντικά ενημερωμένους πολίτες (Shubina, 2022).

Η τεχνολογική καινοτομία προσφέρει σύγχρονες λύσεις όπως τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI) για πρόβλεψη επιδημιολογικών εστιών και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (big data) μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων. Στο Πακιστάν, η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών σε συνδυασμό με εκστρατείες ευαισθητοποίησης συνέβαλε σε μείωση της κυκλοφορίας πολιοιού κατά 50% μέσα σε δύο έτη (WHO, 2025 ; (Alshami et al., 2024). Η περιβαλλοντική επιτήρηση, συνδυασμένη με στοχευμένες εμβολιαστικές εκστρατείες, όπως αυτές του προγράμματος "End Polio Now", οδηγεί σε σημαντική μείωση της μετάδοσης του ιού. Παράλληλα, η ενημέρωση και η εμπλοκή των φορέων σε τοπικό και εθνικό επίπεδο

ενισχύει τη βιωσιμότητα των παρεμβάσεων. Η μακροπρόθεσμη επιτυχία αυτών των προσπαθειών εξαρτάται από τη συνεχή χρηματοδότηση, την πολιτική βούληση και τη διεθνή συνεργασία. Συνολικά, η περιβαλλοντική επιτήρηση αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο στην προσπάθεια εξάλειψης της πολιομυελίτιδας, με τη δυναμική να επεκταθεί και στην πρόληψη άλλων υγειονομικών απειλών. Με την κατάλληλη υποστήριξη και διεπιστημονική προσέγγιση, μπορεί να μετατραπεί σε ένα μακροχρόνιο, βιώσιμο σύστημα προστασίας της Δημόσιας Υγείας.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adu, F. D. (2005). The Virology of the Polio Virus. *Annals of Ibadan Postgraduate Medicine*, 3(1), 13–25. Retrieved June 24, 2025, https://indexmedicus.afro.who.int/iah/fulltext/The_Virology_of_the_Polio_Virus.pdf
- Alleman, M. M., Jorba, J., Riziki, Y., Henderson, E., Mwehu, A., Seakamela, L., Howard, W., Kadiobo Mbule, A., Nsamba, R. N., Djawe, K., Yapi, M. D., Mengouo, M. N., Gumede, N., Ndoutabe, M., Kfutwah, A. K. W., Senouci, K., & Burns, C. C. (2023). Vaccine-derived poliovirus serotype 2 outbreaks and response in the Democratic Republic of the Congo, 2017–2021. *Vaccine*, 41, A35–A47. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2023.02.042>
- Alshami, A., Alzahrani, A., Almalki, F., & Alshamrani, S. (2024). IoT innovations in sustainable water and wastewater management and water quality monitoring: A comprehensive review of advancements, implications, and future directions. *Water Conservation Science and Engineering*. https://www.researchgate.net/publication/380047565_IoT_Innovations_in_Sustainable_Water_and_Wastewater_Management_and_Water_Quality_Monitoring_A_Comprehensive_Review_of_Advancements_Implications_and_Future_Directions
- Asghar, H., Diop, O. M., Weldegebriel, G., Malik, F., Shetty, S., El Bassioni, L., Akande, A. O., Al Maamoun, E., Zaidi, S., Adeniji, A. J., Burns, C. C., Deshpande, J., Oberste, M. S., & Lowther, S. A. (2014). Environmental Surveillance for Polioviruses in the Global Polio Eradication Initiative. *Journal of Infectious Diseases*, 210(suppl 1), S294–S303. <https://doi.org/10.1093/infdis/jiu384>
- Avellón, A., Cabrerizo, M., De Miguel, T., Pérez-Breña, P., Tenorio, A., Pérez, J. L., Martínez De Aragón, M. V., & Trallero, G. (2008). Paralysis Case and Contact Spread of Recombinant Vaccine-derived Poliovirus, Spain. *Emerging Infectious Diseases*, 14(11), 1807–1809. <https://doi.org/10.3201/eid1411.080517>
- Baguune, B., Laryea, E. B., Frimpong, J. A., Dapaa, S., Achempem, K. K., Kenu, E., & Laryea, D. O. (2024). Evaluation of the environmental polio surveillance system—Northern Region, Ghana, 2021. *PLOS ONE*, 19(2), e0294305. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294305>

- Benedetti, G., Wulff Krogsgaard, L., Maritschnik, S., Stüger, H. P., Hutse, V., Janssens, R., Blomqvist, S., Pitkänen, T., Koutsolioutsou, A., Róka, E., Vargha, M., La Rosa, G., Suffredini, E., Cauchie, H.-M., Ogorzaly, L., Van Der Beek, R. F., Lodder, W. J., Madslie, E. H., Baz Lomba, J. A., & Ethelberg, S. (2024). A survey of the representativeness and usefulness of wastewater-based surveillance systems in 10 countries across Europe in 2023. *Eurosurveillance*, 29(33).
<https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2024.29.33.2400096>
- Bricks, L. F., Macina, D., & Vargas-Zambrano, J. C. (2024). Polio Epidemiology: Strategies and Challenges for Polio Eradication Post the COVID-19 Pandemic. *Vaccines*, 12(12), 1323. <https://www.mdpi.com/2076-393X/12/12/1323/pdf?version=1732620195>
- Bubba, L., Benschop, K. S. M., Blomqvist, S., Duizer, E., Martin, J., Shaw, A. G., Bailly, J.-L., Rasmussen, L. D., Baicus, A., Fischer, T. K., & Harvala, H. (2023). Wastewater Surveillance in Europe for Non-Polio Enteroviruses and Beyond. *Microorganisms*, 11(10), 2496. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102496>
- Castro, C. J., Oderinde, B. S., Poston, K. D., Mawashi, K. Y., Bullard, K., Akinola, M., Meade, C., Liu, H., Hu, F., Bullows, J. E., Gonzalez, Z., Pang, H., Sarris, S., Agha, C., Dybdahl-Sissoko, N., Perry, D. B., McDuffie, L., Henderson, E., Burns, C. C., ... Baba, M. (2024). Complete genome sequences of nine double recombinant vaccine-derived novel oral poliovirus type 2 genomes from Nigeria 2023–2024. *Microbiology Resource Announcements*, 13(12), e00881-24.
<https://doi.org/10.1128/mra.00881-24>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2013). Progress toward poliomyelitis eradication—Nigeria, January 2012–September 2013. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, 62(49), 1009–1013.
<https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm6249a5.htm>
- Centers for Disease Control and Prevention. (2006). *Epidemiology and prevention of vaccine-preventable diseases* (9th ed.). Public Health Foundation.
<https://stacks.cdc.gov/view/cdc/78725>
- Centers for Disease Control and Prevention. (2022, August 19). Public health response to a case of paralytic poliomyelitis in an unvaccinated person and detection of poliovirus in wastewater — New York, June–August 2022. *MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report*, 71(33), 1065–1068.
<https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/71/wr/pdfs/mm7144e2-H.pdf>
- Centers for Disease Control and Prevention. (2024, May 9). Laboratory testing for poliovirus. CDC <https://www.cdc.gov/polio/php/laboratories/index.html>
- Child, H. T., Airey, G., Maloney, D. M., Parker, A., Wild, J., McGinley, S., et al. (2023). Comparison of metagenomic and targeted methods for sequencing human pathogenic viruses from wastewater. *mBio*, 14(6), e01468.
<https://doi.org/10.1128/mbio.01468-23>
- Cooper, L. V., Bandyopadhyay, A. S., Grassly, N. C., Gray, E. J., Voorman, A., Zipursky, S., & Blake, I. M. (2025). Global Impact of Mass Vaccination Campaigns

on Circulating Type 2 Vaccine-Derived Poliovirus Outbreaks: An Interrupted Time-Series Analysis. *The Journal of Infectious Diseases*, 231(2), e446–e455.

<https://doi.org/10.1093/infdis/jiae614>

Divizia, M., Cencioni, B., Palombi, L., & Panà, A. (2008). Sewage workers: Risk of acquiring enteric virus infections including Hepatitis A. *The New Microbiologica*, 31, 337–341. http://www.newmicrobiologica.org/PUB/allegati_pdf/2008/3/337.pdf

Duizer, E., Ruijs, W. L., Putri Hintaran, A., Hafkamp, M. C., Van Der Veer, M., & Te Wierik, M. J. (2023). Wild poliovirus type 3 (WPV3)-shedding event following detection in environmental surveillance of poliovirus essential facilities, the Netherlands, November 2022 to January 2023. *Eurosurveillance*, 28(5).

<https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2023.28.5.2300049>

European Centre for Disease Prevention and Control. (2024). Update: Wastewater poliovirus detections in the EU – A call for continued surveillance and maintaining high vaccination coverage rates. <https://www.ecdc.europa.eu/en/news-events/update-wastewater-poliovirus-detections-eu-call-continued-surveillance-and-maintaining>

Farkas, K., Williams, R. C., Hillary, L. S., Garcia-Delgado, A., Jameson, E., Kevill, J. L., Wade, M. J., Grimsley, J. M. S., & Jones, D. L. (2025). Harnessing the Power of Next-Generation Sequencing in Wastewater-Based Epidemiology and Global Disease Surveillance. *Food and Environmental Virology*, 17(1), 5.

<https://doi.org/10.1007/s12560-024-09616-0>

Girón-Guzmán, I., Sánchez, G., & Pérez-Cataluña, A. (2024). Tracking epidemic viruses in wastewaters. *Microbial Biotechnology*, 17(10), e70020.

<https://doi.org/10.1111/1751-7915.70020>

Global Polio Eradication Initiative. (2024). The global polio laboratory network.

<https://www.archive.polioeradication.org/polio-today/polio-now/surveillance-indicators/the-global-polio-laboratory-network-gpln/>

GPEI. (2023). Pakistan's fight to end polio amid the climate crisis.

<https://polioeradication.org/news/pakistans-fight-to-end-polio-amid-the-climate-crisis/>

Greene, S. A., Ahmed, J., Datta, S. D., Burns, C. C., Quddus, A., Vertefeuille, J. F., & Wassilak, S. G. F. (2019). Progress toward polio eradication-Worldwide, January 2017- March 2019. *Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR)* 68(20), 458-462 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31120868/>

Harvala, H., Johannesen, C. K., Benschop, K. S. M., Saxentoff, E. V., Huseynov, S., Hagan, J. E., & Fischer, T. K. (2025). Enterovirus circulation in the WHO European region, 2015–2022: A comparison of data from WHO's three core poliovirus surveillance systems and the European Non-Polio Enterovirus Network (ENPEN). *The Lancet Regional Health - Europe*, 53, 101292.

<https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S2666-7762%2825%2900084-5>

Hellmér, M., Paxéus, N., Magnus, L., Enache, L., Arnholm, B., Johansson, A., et al. (2014). Detection of pathogenic viruses in sewage provided early warnings of

hepatitis A virus and norovirus outbreaks. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(21), 6771–6781. <https://doi.org/10.1128/AEM.01981-14>

Hovi, T., Shulman, L. M., Van Der Avoort, H., Deshpande, J., Roivainen, M., & De Gourville, E. M. (2011). Role of environmental poliovirus surveillance in global polio eradication and beyond. *Epidemiology and Infection*, 140(1), 1–13.

<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/DBB1EC7A25FBB252D7EDF9F2F7939FE3/S095026881000316Xa.pdf/role-of-environmental-poliovirus-surveillance-in-global-polio-eradication-and-beyond.pdf>

Jayche, S., Idrissi, A., Talbi, F. Z., Baghouz, A., Sendaoui, S., Loutfi, A., Dahou, B., Lahmam, M., Najy, M., Thouhami Ahami, A. O., & Elmahjoub, A. (2024). Evaluation of WHO indicators for surveillance of acute flaccid paralysis in children: The case of Kenitra province, Morocco; from 1994 to 2018. *Bangladesh Journal of Medical Science*, 23(4), 1185–1196. <https://www.banglajol.info/index.php/BJMS/article/view/76536/50475>

Jorba, J., Campagnoli, R., De, L., & Kew, O. (2022). Sustained detection of type 2 poliovirus in London sewage between January and July 2022. *The Lancet*, 399(10327), 1804–1806. <https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S0140-6736%2822%2901804-9>

Kalkowska, D. A., Duintjer Tebbens, R. J., Pallansch, M. A., et al. (2015). Modeling undetected live poliovirus circulation after apparent interruption of transmission: implications for surveillance and vaccination. *BMC Infectious Diseases*, 15, 66. <https://bmcinfectdis.biomedcentral.com/counter/pdf/10.1186/s12879-015-0791-5.pdf>

Karthikeyan, S., Levy, J. I., De Hoff, P., Humphrey, G., Novak, R. T., Hicks, J. A., & Andersen, K. G. (2022). Wastewater sequencing reveals early cryptic SARS CoV 2 variant transmission. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9433318/pdf/41586_2022_Article_5049.pdf

Kew, O. M., Sutter, R. W., De Gourville, E. M., Dowdle, W. R., & Pallansch, M. A. (2005). VACCINE-DERIVED POLIOVIRUSES AND THE ENDGAME STRATEGY FOR GLOBAL POLIO ERADICATION. *Annual Review of Microbiology*, 59(1), 587–635. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.58.030603.123625>

Kitakawa, K., Kitamura, K., & Yoshida, H. (2023). Monitoring Enteroviruses and SARS-CoV-2 in Wastewater Using the Polio Environmental Surveillance System in Japan. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(4), e01853-22. <https://doi.org/10.1128/aem.01853-22>

Klapsa, D., Wilton, T., Zealand, A., Bujaki, E., Saxentoff, E., Troman, C., Shaw, A. G., Tedcastle, A., Majumdar, M., Mate, R., Akello, J. O., Huseynov, S., Zeb, A., Zambon, M., Bell, A., Hagan, J., Wade, M. J., Ramsay, M., Grassly, N. C., ... Martin, J. (2022). Sustained detection of type 2 poliovirus in London sewage between February and July, 2022, by enhanced environmental surveillance. *The Lancet*,

400(10362), 1531–1538. <https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S0140-6736%2822%2901804-9>

Kmush, B., Kearney, S. M., Riley, K., Gallagher, D. M., Wu, C., Islam, M., & Bibby, K. (2022). Comparability of 24-hour composite and grab samples for detection of SARS-CoV-2 RNA in wastewater. *FEMS Microbes*, 3(3), xtac017.

<https://academic.oup.com/femsmicrobes/article-pdf/doi/10.1093/femsmc/xtac017/52943526/xtac017.pdf>

Kumar, M., Joshi, M., Patel, A. K., & Joshi, C. G. (2021). Unravelling the early warning capability of wastewater surveillance for COVID-19: A temporal study on SARS-CoV-2 RNA detection and need for the escalation. *Environmental Research*, 196, 110946. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110946>

Larson, H. (2013, Νοέμβριος 21). The Surge. WIRED.

<https://www.wired.com/story/polio-vaccine/>

Li Hi Shing, S., Chipika, R. H., Finegan, E., Murray, D., Hardiman, O., & Bede, P. (2019). Post polio Syndrome: More Than Just a Lower Motor Neuron Disease. *Frontiers in Neurology*, 10, 773.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6646725/pdf/fneur-10-00773.pdf>

Luo, H.-M., Zhang, Y., Wang, X.-Q., Yu, W.-Z., Wen, N., Yan, D.-M., Wang, H.-Q., Wushouer, F., Wang, H.-B., Xu, A.-Q., Zheng, J.-S., Li, D.-X., Cui, H., Wang, J.-P., Zhu, S.-L., Feng, Z.-J., Cui, F.-Q., Ning, J., Hao, L.-X., ... Yang, W.-Z. (2013). Identification and Control of a Poliomyelitis Outbreak in Xinjiang, China. *New England Journal of Medicine*, 369(21), 1981–1990.

<https://doi.org/10.1056/NEJMoa1303368>

Marcet, P. L., Short, B., Deas, A., Sun, H., Harrington, C., Shaukat, S., Alam, M. M., Baba, M., Faneye, A., Namuwulya, P., Apostol, L. N., Elshaarawy, T., Odoom, J. K., Borus, P., Moonsamy, S., Riziki, Y., Endegue Zanga, M. C., Tefera, M., Kfutwah, A. K. W., ... Gerloff, N. (2025). Advancing poliovirus eradication: Lessons learned from piloting direct molecular detection of polioviruses in high-risk and priority geographies. *Microbiology Spectrum*, 13(2), e02279-24.

<https://journals.asm.org/doi/reader/10.1128/spectrum.02279-24>

Melnick, J. L. (1947). POLIOMYELITIS VIRUS IN URBAN SEWAGE IN EPIDEMIC AND IN NONEPIDEMIC TIMES¹. *American Journal of Epidemiology*, 45(2), 240–253. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a119132>

Melnick, J. L. (1997). Poliovirus and other enteroviruses. In A. S. Evans & R. A. Kaslow (Eds.), *Viral infections of humans* (4th ed., pp. 583–663). Plenum Press.

Meschke, J.S., et al. (2020). Feasibility of the Bag-Mediated Filtration System for Environmental Surveillance of Poliovirus in Kenya. *Food and Environmental Virology*, 12(1), 35–47. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12560-019-09412-1.pdf>

Nakamura, T., Hamasaki, M., Yoshitomi, H., Ishibashi, T., Yoshiyama, C., Maeda, E., Sera, N., & Yoshida, H. (2015). Environmental Surveillance of Poliovirus in Sewage

Water around the Introduction Period for Inactivated Polio Vaccine in Japan. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(5), 1859–1864.

<https://doi.org/10.1128/AEM.03575-14>

Nathanson, N., & Kew, O. M. (2010). From emergence to eradication: The epidemiology of poliomyelitis deconstructed. *American Journal of Epidemiology*, 172(11), 1213–1229. <https://academic.oup.com/aje/article-pdf/172/11/1213/487097/kwq320.pdf>

Njile, D. K., Sadeuh-Mba, S. A., Tabonfack Atemkeng, M., Ahanda, A., Momo, J. B., Pekekue Nforifum, R., Etéré, E., Endegue-Zanga, M. C., Boyomo, O., Djoumetio, M. D., Anfumbom Kfutwah, J., Diop, O. M., & Njouom, R. (2024). Occurrence of poliovirus and non-polio enterovirus among children with acute flaccid paralysis in Cameroon from 2015 to 2020. *The Journal of Infection in Developing Countries*, 18(02), 291–298. <https://www.jidc.org/index.php/journal/article/view/38484358/3288>

Pattison, K. (2020). An Historical View of Nursing and Polio. *OJIN: The Online Journal of Issues in Nursing*, 26(1). <https://doi.org/10.3912/OJIN.Vol26No01PPT05>

Riaz, A., Mohiuddin, S., Husain, S., Yousafzai, M. T., Sajid, M., Kabir, F., Rehman, N. U., Mirza, W., Salam, B., Nadeem, N., & Khan, M. (2021). Polio vaccine misinformation on social media: Turning point in the fight against polio eradication in Pakistan. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 17(9), 2927–2931. <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/21645515.2021.1894897?needAccess=true>

Ross, J., Diallo, A. A., Kirkby, K., Asghar, H., Yehualashet, Y. G., Yehia, M., ... & Zaffran, M. (2022). Facilitators and barriers of infectious diseases surveillance activities: Lessons from the Global Polio Eradication Initiative – a mixed-methods study. *BMC Public Health*, 22(1), 215. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9109099/pdf/bmjopen-2022-060885.pdf>

Rowland, T., Gopal, R., Patel, M., Celma, C., Campbell, C. N., Machin, N., Taylor, S., Graham, S., Harris, K., Pereira, S., Saliba, V., & Zambon, M. (2025). Community surveillance after detection of poliovirus in the environment in London, United Kingdom, October 2022 to April 2023. *Eurosurveillance*, 30(16). <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2025.30.16.2500025>

Ruszel, K., & Nieradko-Iwanicka, B. (2020). Is polio eradication possible? *Journal of Education, Health and Sport*, 10(9), 66–75. <https://doi.org/10.12775/JEHS.2020.10.09.007>

Seo, G. E., Mandes, R., Wright, N. D., Hawkins, J. P., Landgraff, A., Lidder, R., Mohammed, U., Mangat, C. S., Michel, A.-S., Fafard, J., Hole, D., Tyler, A. D., Vlok, M., Grudeski, E., Booth, T. F., & Majer, A. (2025). Sporadic detection of vaccine-derived poliovirus type 2 using next-generation sequencing in Canadian wastewater in August of 2022. *Scientific Reports*, 15(1), 12913. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92912-x>

Shabana, M. R., Zaghloul, A. Y., El Shaarawy, T. H., Elleboudy, N. S., & Aboshanab, K. M. (2024). Monitoring the VDPV2 outbreak in Egypt during 2020–2021 highlights

the crucial role of environmental surveillance and boosting immunization in combating Poliovirus. *BMC Infectious Diseases*, 24(1), 866.
<https://bmcinfectdis.biomedcentral.com/counter/pdf/10.1186/s12879-024-09731-0.pdf>

Shubina, D. (2022). Integration of WASH and Polio Programs in Afghanistan: Addressing Hygiene to Combat Polio. <https://www.poliokit.org/news/integration-wash-and-polio-programs-afghanistan-addressing-hygiene-combat-polio>

Takahashi, H., Fujimoto, A., Shiraishi, M., Ishii, D., & Suzuki, H. (2023). Monitoring enteroviruses and SARS CoV 2 in wastewater using the polio environmental surveillance system in Japan. *International Journal of Infectious Diseases – Regions*, available at PubMed Central.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10132113/pdf/aem.01853-22.pdf>

Toro, L., De Valk, H., Zanetti, L., Huot, C., Tarantola, A., Fournet, N., Moulin, L., Atoui, A., Gassilloud, B., Mouly, D., & Jourdain, F. (2024). Pathogen prioritisation for wastewater surveillance ahead of the Paris 2024 Olympic and Paralympic Games, France. *Eurosurveillance*, 29(28). <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2024.29.28.2400231>

Trevelyan, B., Smallman-Raynor, M., & Cliff, A. D. (2005). The Spatial Dynamics of Poliomyelitis in the United States: From Epidemic Emergence to Vaccine-Induced Retreat, 1910–1971. *Annals of the Association of American Geographers*, 95(2), 269–293. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2005.00460.x>

UK Health Security Agency. (2022). Immediate actions in response to detection of a ‘circulating’ vaccine-derived polio virus type 2 (VDPV2) in London sewage samples. <https://www.gov.uk/government/publications/polio-detection-of-vdpv2-in-london-sewage-samples/immediate-actions-in-response-to-detection-of-vaccine-derived-polio-virus-type-2-vdpv2-in-london-sewage-samples>

van der Sanden, S. M. G., Koopmans, M. P. G., & van der Avoort, H. G. (2013). Detection of human enteroviruses and parechoviruses as part of the national enterovirus surveillance in the Netherlands, 1996–2011. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 32(12), 1525–1531.
<https://doi.org/10.1007/s10096-013-1906-9>

Warraich, H. J. (2009). Religious opposition to polio vaccination. *Emerging Infectious Diseases*, 15(6), 978. <https://doi.org/10.3201/eid1506.090087>

Whitehouse, E. R., Gerloff, N., English, R., Reckling, S. K., Alazawi, M. A., Fuschino, M., St George, K., Lang, D., Rosenberg, E. S., Omeregie, E., Rosen, J. B., Kitter, A., Korban, C., Pacilli, M., Jeon, T., Coyle, J., Faust, R. A., Xagorarakis, I., Miyani, B., ... Kidd, S. (2024). Wastewater Surveillance for Poliovirus in Selected Jurisdictions, United States, 2022–2023. *Emerging Infectious Diseases*, 30(11).
<https://doi.org/10.3201/eid3011.240771>

Wieczorek, M., Gad, B., Krzysztozek, A., Kłosiewicz, P., Oleksiak, K., Zaborski, B., Grzesiowski, P., Tkaczuk, K., & Baumann-Popczyk, A. (2025). Detection of vaccine-derived poliovirus type 2 from sewage samples and public health response, Poland,

November to December 2024. *Eurosurveillance*, 30(1). <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2025.30.1.2400805>

Willyard, C. Polio: The eradication endgame. *Nature* 507, S14–S15 (2014). <https://www.nature.com/articles/507S14a.pdf>

World Health Organization (2025). Disease Outbreak News; Circulating vaccine-derived poliovirus type 2 (cVDPV2) – Papua New Guinea. <https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2025-DON571>

World Health Organization, Department of Immunization, Vaccines and Biologicals. (2003). Guidelines for environmental surveillance of poliovirus circulation (WHO/V&B/03.03). World Health Organization. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/67854/WHO_V-B_03.03_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y

World Health Organization. (2004). Polio laboratory manual (4th ed., WHO/IVB/04.10). World Health Organization. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/68762/WHO_IVB_04.10.pdf?sequence=1&isAllowed=y

World Health Organization. (2021). Meeting of the Strategic Advisory Group of Experts on Immunization, 22–24 March 2021: Conclusions and recommendations. *Weekly Epidemiological Record*, 96(22), 197–216. <https://www.who.int/publications/i/item/meeting-of-the-strategic-advisory-group-of-experts-on-immunization-22-24-march-2021-conclusions-and-recommendations>

World Health Organization. (2023). Field guidance for the implementation of environmental surveillance for poliovirus. World Health Organization, on behalf of the Global Polio Eradication Initiative. ISBN 978-92-4-005754-8 <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/368833/9789240057548-eng.pdf>

World Health Organization. (2025, April 10). Statement of the forty first meeting of the International Health Regulations (IHR) Emergency Committee regarding the international spread of poliovirus. <https://www.who.int/news/item/10-04-2025-statement-of-the-forty-first-meeting-of-the-polio-ihremergency-committee>

Xiao, K., & Zhang, L. (2023). Wastewater pathogen surveillance based on One Health approach. *The Lancet Microbe*, 4(5), e297. [https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(23\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(23)00039-3)

Yang, X., Cai, S., Wu, X., Zhang, Y., Li, D., Chen, Y., Chen, Q., Zhu, S., Yan, D., Xu, W., Zhang, H., Chen, Z., Zhang, S., Zhou, Y., Zhang, M., Zheng, N., & You, N. (2023). Analysis of the distribution characteristics of enterovirus types based on environmental surveillance from 2013 to 2021 in Fujian Province, China. *Biosafety and Health*, 5(4), 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.bsheal.2023.05.003>

ΕΟΔΥ (2021). Πολιομυελίτιδα, Εθνικός Οργανισμός Δημόσιας Υγείας. <https://eody.gov.gr/disease/poliomyelitida/> ,