



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ»
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΔΙΟΙΚΗΣΗ LOGISTICS

ΠΤΥΧΕΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗΣ
ΑΛΥΣΙΔΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΕΠΙΔΗΜΙΩΝ: Η
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΝΔΗΜΙΑΣ COVID-19

ΓΙΑΝΝΑΡΟΥ ΙΩΑΝΝΑ (ΤΜΛ 1918)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΡΑΧΑΝΙΩΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2022

ΔΗΛΩΣΗ

«Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου».

«Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού ΜΔΕ ανήκουν στο μεταπτυχιακό φοιτητή και το επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και τον επιβλέποντα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα) ως συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του μη συμμετέχοντα στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο».

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ραχανιώτη Νικόλαο για την πολύτιμη βοήθεια και συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική υποστήριξη και τη βοήθεια που μου προσέφερε για να καταφέρω να επιτύχω τους στόχους μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την εξέταση πτυχών της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας στον έλεγχο επιδημιών εστιάζοντας στην περίπτωση της πανδημίας COVID-19. Γενικά, η εμφάνιση μιας επιδημίας μπορεί να αποτελέσει σημαντική απειλή για τον άνθρωπο σε παγκόσμια κλίμακα, δημιουργώντας την επιτακτική ανάγκη για άμεση λήψη αποφάσεων και εφαρμογή πρακτικών για τον περιορισμό της εξάπλωσης της. Με την πρόσφατη πανδημία COVID-19 και προκειμένου να ελεγχθεί η εξάπλωση της, απαιτήθηκε η καθημερινή χρήση εξοπλισμού ατομικής προστασίας, όπως για παράδειγμα μάσκες και γάντια, όχι μόνο σε νοσοκομειακό περιβάλλον αλλά και στο εργασιακό και οικιακό περιβάλλον. Η μαζική χρήση αυτών των μέσων προστασίας οδήγησε όχι μόνο σε ελλείψεις στην παραγωγή και αδυναμία διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας αλλά και στην αύξηση των ιατρικών αποβλήτων. Η δημιουργία ενός αποτελεσματικού δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής για την διαχείριση του μολυσμένου από τον ιό εξοπλισμού μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στη μείωση της εξάπλωσης του και την αποφυγή δημιουργίας νέων εστιών μόλυνσης. Βιβλιογραφικά, ειδικά τον τελευταίο χρόνο, έχουν δημοσιευθεί μελέτες για σωστές πρακτικές διαχείρισης αυτού του εξοπλισμού μετά το πέρας του κύκλου ζωής του, καθώς και μελέτες για την αποστείρωση και την επαναχρησιμοποίηση του, αλλά δυστυχώς είναι λίγες οι χώρες που τις έχουν εφαρμόσει. Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρει και εξετάζει μερικές από αυτές τις πρακτικές, επισημαίνοντας τις προκλήσεις της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας και τονίζοντας την ανάγκη για επένδυση σε έρευνα αλλά και την υιοθέτηση αποτελεσματικών στρατηγικών αντιμετώπισης επιδημιών σε παγκόσμιο επίπεδο.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to examine aspects of reverse logistics in epidemics control, focusing on the COVID-19 pandemic. In general, the emergence of an epidemic can pose a significant threat for humans on a global basis, creating the urgent need for immediate decision-making and implementation of interventions to contain its spread. With the recent COVID-19 pandemic and in order to contain it, the large-scale use of personal protective equipment, such as masks and gloves, was required not only in a hospital environment but in the work and domestic environment too. The massive use of protective equipment has led not only to shortages in production and inability to manage its supply chain but also to an increase in the production rate of medical waste. Establishing an effective network of reverse logistics to manage virus-infected equipment can significantly help to reduce the spread of the virus and avoid the creation of new outbreaks of the infection. Several studies have been published, especially during 2020, on the proper management practices regarding this equipment after the end of its life cycle, including sterilization and re-use, but unfortunately only a few countries have applied them. This thesis reports and examines some of these practices by highlighting the challenges of reverse logistics for this kind of equipment and pointing out the need to invest in research and to adopt effective strategies to contain epidemics at global level.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	8
Κεφάλαιο 2: Εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτης ανάγκης	10
2.1 Ο ρόλος της εφοδιαστικής αλυσίδας έκτακτης ανάγκης στον έλεγχο επιδημιών	10
2.2 Βασικές ενέργειες για τον περιορισμό μίας επιδημίας.....	11
2.3 Προβλήματα στην εφαρμογή των Διεθνών Κανονισμών Υγείας κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19	14
Κεφάλαιο 3: Η διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας – Απειλή για την εξάπλωση του ιού	17
3.1 Στρατηγικές και προκλήσεις στη διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας κατά την πανδημία COVID-19.....	17
3.2 Πρακτικές και επικαιροποιημένες κατευθυντήριες γραμμές για τη διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας	20
3.3 Εναλλακτικές στρατηγικές για βιώσιμη διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας	22
3.4 Προτάσεις – Συστάσεις	24
Κεφάλαιο 4: Αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα: Το μέσο για την αντιμετώπιση της εξάπλωσης του ιού.....	27
4.1 Χωροθέτηση εγκαταστάσεων και στρατηγικές μεταφοράς του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού	27
4.2 Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, του κινδύνου μόλυνσης και της μέγιστης ποσότητας του μη συλλεγόμενου μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού	32
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	37
Βιβλιογραφία.....	40
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....	43
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.....	47

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Τα τέσσερα στάδια περιορισμού μιας πανδημίας (WHO, 2005)	12
Εικόνα 2: Καμπύλη ρυθμού ροής ιατρικών αποβλήτων κατά την πανδημία COVID-19 (Klemes et al., 2020)	18
Εικόνα 3: Τάση ροής των ιατρικών αποβλήτων και των στερεών αστικών αποβλήτων (Klemes et al., 2020)	19
Εικόνα 4: Κατασκευή λάκκου για την ταφή βιοϊατρικών αποβλήτων κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης (Sharma et al., 2020)	22
Εικόνα 5: Δίκτυο αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για την αποτελεσματική διαχείριση ιατρικών αποβλήτων σε περίπτωση επιδημίας (Yu, et al., 2020)	28
Εικόνα 6: Δομή προτεινόμενου δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας (Kargar et al., 2020)	33

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ της εφοδιαστικής αλυσίδας έκτακτης ανάγκης και της εφοδιαστικής αλυσίδας έκτακτης ανάγκης για τον έλεγχο επιδημιών (Jiang et al., 2020)	11
--	----

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τον Δεκέμβριο του 2019, στην πόλη Wuhan της Κίνας, αναφέρθηκε η εμφάνιση μιας άγνωστης περίπτωσης πνευμονίας. Μετά από αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι αυτή η πνευμονία προκλήθηκε από ένα νέο κοροναϊό, τον SARS-CoV-2. Τον Μάρτιο του 2020, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας κηρύσσει το ξέσπασμα της COVID-19 ως πανδημία. Μέχρι τις 10 Μαρτίου του 2022 είχαν αναφερθεί παγκοσμίως 452.454.541 περιπτώσεις μολύνσεων και 6.046.426 θάνατοι (Worldometer, 2022).

Η πανδημία COVID-19 έφερε ριζικές αλλαγές στην οικονομική και κοινωνική ζωή, και σχεδόν κάθε τομέας, εξαιρουμένων των ιατρικών προϊόντων, των τροφίμων και των τομέων πληροφορικής, επηρεάστηκε αρνητικά από αυτό το ξέσπασμα. Ειδικά οι τομείς των μεταφορών, του τουρισμού, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ενέργειας και των ειδών λιανικής εκτός των τροφίμων, είναι εκείνοι που υπέστησαν την μεγαλύτερη ζημιά (Senir and Arzum, 2020). Λόγω της δια-τομεακής αλληλεπίδρασης και των ανταλλαγών αγαθών/υπηρεσιών, εμπόδια ή στασιμότητα σε έναν τομέα επηρεάζουν άμεσα άλλες επιχειρήσεις και τομείς. Το αποτέλεσμα ήταν μια πρωτοφανής κρίση κατά την οποία εκδηλώθηκαν διαταραχές στην προσφορά και τη ζήτηση (Senir and Arzum, 2020), δημιουργώντας έτσι επιπτώσεις σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα.

Προκειμένου να περιοριστεί η εξάπλωση της πανδημίας, οι χώρες υιοθέτησαν πρακτικές και κανόνες υγιεινής, βάσει των οδηγιών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, όπως την αποφυγή συνωστισμού, απαγορεύσεις κυκλοφορίας και την χρήση εξοπλισμού ατομικής προστασίας (μάσκες, γάντια, κ.λπ.) σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Η καθημερινή χρήση αυτού του εξοπλισμού ατομικής προστασίας έχει αποτελέσει θέμα μείζονος ανησυχίας καθώς όχι μόνο αυξήθηκε η παραγωγή ιατρικών αποβλήτων αλλά αποτελεί και θέμα δημόσιας υγείας, καθώς η μη ασφαλής διαχείριση του μπορεί να προκαλέσει νέες εστίες μολύνσεων.

Γενικά, αυτός ο εξοπλισμός μετά το πέρας του κύκλου ζωής του διατίθεται για υγειονομική ταφή ή αποτέφρωση. Ωστόσο, σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης απορρίπτονται μαζί με τα δημοτικά στερεά απόβλητα σε ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής. Η έλλειψη ευαισθητοποίησης για τους κινδύνους υγείας που σχετίζονται με τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης, η ανεπαρκής κατάρτιση στην ορθή διαχείριση των αποβλήτων, η απουσία συστημάτων διαχείρισης και διάθεσης των αποβλήτων, οι ανεπαρκείς οικονομικοί και ανθρώπινοι πόροι και η χαμηλή προτεραιότητα που δίνεται στο θέμα αυτό είναι τα πιο κοινά προβλήματα που σχετίζονται με τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης. Πολλές χώρες είτε δεν διαθέτουν κατάλληλους κανονισμούς, είτε δεν τους εφαρμόζουν (WHO, 2018).

Ο σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού και αξιόπιστου δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για την διαχείριση του μολυσμένου από τον ιό εξοπλισμού μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της εξάπλωσης της πανδημίας και την αποφυγή δημιουργίας νέων εστιών μόλυνσης. Η αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα ορίζεται ως «Η διαδικασία σχεδιασμού, υλοποίησης και ελέγχου της αποτελεσματικής, οικονομικά αποδοτικής ροής πρώτων υλών, αποθέματος κατά τη διαδικασία, τελικών προϊόντων και σχετικών πληροφοριών από το σημείο κατανάλωσης έως το σημείο προέλευσης με σκοπό την ανάκτηση αξίας ή τη σωστή διάθεση» (Govindan et al.,

2015). Ο κύριος στόχος της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας είναι η μεγιστοποίηση της ανακτηθείσας αξίας από τα προϊόντα στο τέλος του κύκλου ζωής τους μέσω της ανακύκλωσης, της επαναχρησιμοποίησης και της ανάκτησης ενέργειας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να αναφέρει κάποιες πρακτικές διαχείρισης του εξοπλισμού ατομικής προστασίας μετά το πέρας του κύκλου ζωής του καθώς και να παρουσιάσει προτεινόμενα δίκτυα αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για τη διαχείριση του με πραγματικές μελέτες περίπτωσης.

Αρχικά, γίνεται αναφορά στον ρόλο που κατέχει η εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτης ανάγκης στον έλεγχο των επιδημιών, τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την έξαρση της πανδημίας COVID-19 και πώς με τη βελτίωση της λειτουργικότητας της μπορεί να αντιμετωπιστεί καλύτερα μια απρόσμενη δημόσια κρίση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στρατηγικές και προκλήσεις για την αποτελεσματική διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας, πρακτικές και εναλλακτικές στρατηγικές για μια πιο βιώσιμη διαχείριση του καθώς και προτάσεις για την βελτιστοποίηση του τομέα διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων.

Έπειτα ακολουθεί η παρουσίαση προτεινόμενων δικτύων αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας τα οποία απεικονίζονται μέσω μαθηματικών μοντέλων και επαληθεύονται μέσα από μελέτες περίπτωσης με πραγματικά δεδομένα.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, οι προτεινόμενες λύσεις καθώς και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2: Εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτης ανάγκης

2.1 Ο ρόλος της εφοδιαστικής αλυσίδας έκτακτης ανάγκης στον έλεγχο επιδημιών

Ο περιορισμός μιας πανδημίας περιλαμβάνει κυρίως τρεις στόχους: 1) τη μείωση του ποσοστού μόλυνσης του εύάλωτου πληθυσμού, 2) την ελαχιστοποίηση του ποσοστού θνησιμότητας του μολυσμένου πληθυσμού και 3) τον εμβολιασμό του πληθυσμού. Για την επίτευξη αυτών των στόχων πρέπει να ληφθούν σημαντικές αποφάσεις όπως ο περιορισμός της κυκλοφορίας/καραντίνα και η δημιουργία προγράμματος εμβολιασμού και εμβολιαστικών κέντρων. Εκτός από την επιτυχία των μέτρων περιορισμού, απαιτείται επιπλέον ο συντονισμός της εφοδιαστικής αλυσίδας για την εξασφάλιση της ομαλής ροής των βασικών αγαθών. Αυτό είναι μια τεράστια πρόκληση για τα εμπλεκόμενα μέρη λόγω της ποικιλομορφίας της ιεραρχίας τους ενώ και χωρίς τον συντονισμό τους μπορεί να καταρρεύσει ολόκληρο το σύστημα διαχείρισης.

Η πανδημία COVID-19 έχει δημιουργήσει τεράστιο αντίκτυπο στην οικονομία αλλά και την κοινωνική ανάπτυξη των χωρών όλου του πλανήτη. Η εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης για τη μείωση της διασποράς του ιού από τις κυβερνήσεις οδήγησε σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης, δημιουργώντας έτσι επιπτώσεις και στην εφοδιαστική αλυσίδα. Ο κλάδος της εφοδιαστικής είναι ένα από τα σημαντικά στοιχεία ενός εθνικού συστήματος διαχείρισης έκτακτης ανάγκης (Zhang and Sun, 2020). Συνεπώς, η εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτης ανάγκης παίζει έναν σημαντικό ρόλο στην πρόληψη και τον έλεγχο επιδημιών.

Η διαχείριση των αλυσίδων εφοδιασμού έκτακτης ανάγκης ή ανθρωπιστικής βοήθειας προσέλκυσε πρόσφατα την προσοχή τόσο των επαγγελματιών όσο και των ερευνητών. Τέτοιες αλυσίδες εφοδιασμού έχουν πολλά κοινά με τις εμπορικές αλυσίδες εφοδιασμού, αλλά ταυτόχρονα θέτουν σημαντικές προκλήσεις καθώς λειτουργούν υπό αβέβαιες, και πολλές φορές χαοτικές συνθήκες (Dasaklis et al., 2012). Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετές διαφορές ανάμεσα σε μια εμπορική εφοδιαστική αλυσίδα και μια εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτης ανάγκης. Για παράδειγμα, η διαχείριση των πόρων για την εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτης ανάγκης αποτελεί μία πρόκληση καθώς το λειτουργικό περιβάλλον είναι αβέβαιο, αφού οι πόροι αποδίδονται τόσο από τον δημόσιο όσο και από τον ιδιωτικό τομέα, ενώ στην εμπορική εφοδιαστική αλυσίδα οι πόροι είναι γνωστοί και εύκολα ελεγχόμενοι από τους προμηθευτές υπηρεσιών εφοδιαστικής. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι η ανταλλαγή πληροφοριών για την ζήτηση σε πραγματικό χρόνο. Στην περίπτωση της εμπορικής εφοδιαστικής αλυσίδας, οι πληροφορίες για τη ζήτηση (π.χ. οι παραγγελίες προϊόντων) παρέχονται απευθείας από τους ίδιους τους πελάτες, ενώ στην εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτης ανάγκης η παροχή πληροφοριών ζήτησης μπορεί να είναι ασυνεπής.

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της γενικότερης εφοδιαστικής αλυσίδας έκτακτης ανάγκης και της εφοδιαστικής αλυσίδας έκτακτης ανάγκης για τον έλεγχο επιδημιών. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται μερικές από αυτές.

	General Emergency Logistics	Pandemic Emergency Logistics
Top priority	Saving lives.	Saving lives and blocking-up the source of infection.
Types of materials	Large rescue equipment (such as excavators), professional rescue materials (such as life detector) and living materials (such as drinking water, etc.).	Medical supplies (such as life-support machines, ECMO cardiopulmonary bypass machines) and protective materials (such as masks, disinfectant, and isolation gowns); for some closed communities, living materials are also in great demand.
Service object	Victims.	All people in and near the epidemic area.
Delivery method	General distribution without special restrictions.	Contactless distribution.
Restricted traffic	Some roads may be damaged, and means of conveyance are severely restricted.	All kinds of transportation are unobstructed.
Scope of demand area	Scope of demand area.	National and global.
Duration	The duration is short, even a few days.	Uncertainty; so far, it has been going on for months.

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ της εφοδιαστικής αλυσίδας έκτακτης ανάγκης και της εφοδιαστικής αλυσίδας έκτακτης ανάγκης για τον έλεγχο επιδημιών (Jiang et al., 2020)

Στην εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτης ανάγκης για τον έλεγχο επιδημιών η πρώτη προτεραιότητα εκτός από το να σωθούν ζωές, είναι να εντοπιστεί και να απομονωθεί εγκαίρως η πηγή της μόλυνσης. Εξίσου σημαντικό και στις δύο περιπτώσεις είναι να διατεθεί άμεσα ο απαραίτητος εξοπλισμός, όχι μόνο για να σωθούν ζωές, αλλά στην περίπτωση της πανδημίας να περιοριστεί η διασπορά, καθώς αφορά έναν πολύ μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπων και αυτό καθίσταται μια τεράστια πρόκληση. Η διάρκεια μιας πανδημίας είναι αβέβαιη και γι' αυτό τον λόγο οι κυβερνήσεις πρέπει να δημιουργήσουν στρατηγικά αποθέματα εξοπλισμού έκτακτης ανάγκης αλλά και εναλλακτικές πηγές προμήθειας αυτού. Στην περίπτωση της πανδημίας COVID-19, η Κίνα αποτελούσε αρχικά τον μοναδικό προμηθευτή масκών λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής. Η παύση παραγωγής τους σε αρκετές μονάδες στο πλαίσιο των μέτρων που πήρε για τον περιορισμό της διασποράς, δημιούργησε τεράστιες ελλείψεις παγκοσμίως και αφού δεν υπήρχε το απαραίτητο απόθεμα, ο ανταγωνισμός μεταξύ των χωρών για την εξασφάλιση τους ήταν υψηλός.

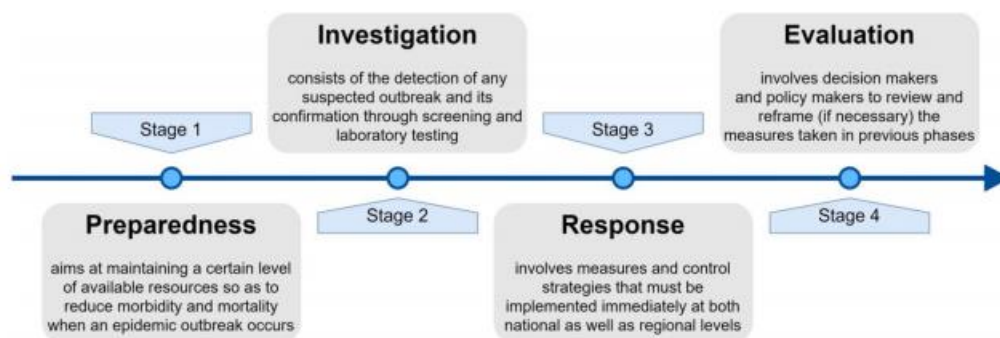
Παρόλο που οι δύο αλυσίδες εφοδιασμού έκτακτης ανάγκης έχουν πολλά κοινά μεταξύ τους, συγκριτικά οι αλυσίδες εφοδιασμού έκτακτης ανάγκης για τον έλεγχο επιδημιών είναι αναμφίβολα πιο δύσκολες και πιο απαιτητικές. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι βασικοί στόχοι στην διαχείριση των εφοδιαστικών αλυσίδων ήταν η αποδοτικότητα, η ελαχιστοποίηση του κόστους και η αποφυγή διατήρησης αποθεμάτων. Πρόκειται για μια προσέγγιση η οποία ισχύει για σταθερά λειτουργικά περιβάλλοντα με προβλέψιμη ζήτηση και μακροπρόθεσμες σχέσεις με τους προμηθευτές. Δεν ισχύει όμως για όλες τις αλυσίδες εφοδιασμού. Οι αλυσίδες εφοδιασμού που ακολουθούν αυτές τις αρχές είναι επιρρεπείς στην κατάρρευση όταν αντιμετωπίζουν μία κρίση. Γι αυτό τον λόγο χρειάζεται όλο και περισσότερη ευελιξία και διαλειτουργικότητα για την εξέλιξη των αλυσίδων εφοδιασμού και τη σωστή λειτουργία τους σε κρίσιμες περιόδους όπως αυτή μιας πανδημίας.

2.2 Βασικές ενέργειες για τον περιορισμό μίας επιδημίας

Για την αντιμετώπιση μιας επιδημικής έξαρσης, οι κυβερνήσεις σε συνεργασία με τους υγειονομικούς οργανισμούς πρέπει να διαθέτουν σχέδια έκτακτης ανάγκης και λύσεις που θα διασφαλίζουν την αποτελεσματική διαχείριση όλων των

δραστηριοτήτων εφοδιαστικής κατά τις φάσεις μιας επιδημίας, τις οποίες ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (2005) τις κατατάσσει ως εξής (Εικόνα 1):

- Ετοιμότητα
- Έρευνα
- Απόκριση
- Αξιολόγηση



Εικόνα 1: Τα τέσσερα στάδια περιορισμού μιας πανδημίας (WHO, 2005)

Η πρώτη φάση, της ετοιμότητας, έχει ως στόχο την διατήρηση αποθέματος ιατροφαρμακευτικού εξοπλισμού, σε επίπεδα ικανά έτσι ώστε να περιοριστεί η εξάπλωση μιας επιδημίας τις πρώτες μέρες του ξεσπάσματος. Επίσης, η προμήθεια εμβολίων παίζει καθοριστικό ρόλο στην πορεία της εξέλιξης της. Σημαντικά σημεία στις αποφάσεις με γνώμονα την εφοδιαστική αλυσίδα είναι τα παρακάτω (Dasaklis et al., 2012):

- Προσδιορισμός πηγών για την προμήθεια ιατρικών προμηθειών και σχετικών προϊόντων
- Διαχείριση συμβολαίων για όλα τα προμηθευόμενα υλικά
- Διαχείριση αποθέματος για όλες τις απαραίτητες ιατρικές προμήθειες (εμβόλια, αντιβιοτικά, αντιρετροϊκά φάρμακα) και συμπληρωματικά ιατρικά είδη (ατομικά προστατευτικά είδη)
- Περιοδική αναθεώρηση και ενημέρωση ιατρικών προμηθειών
- Θέση εγκατάστασης και προσδιορισμός χωρητικότητας για κέντρα αποθήκευσης
- Σχεδιασμός δικτύου για δραστηριότητες μεταφοράς/διανομής και επιλογή των κατάλληλων μέσων για δραστηριότητες μεταφοράς/διανομής
- Επιλογή κατάλληλων εγκαταστάσεων εμβολιασμού / συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης και της χωρητικότητας τους (μέγεθος, διαθεσιμότητα δωματίων, διαθεσιμότητα και προγραμματισμός προσωπικού, κ.λπ.)
- Διαθεσιμότητα πόρων

Η δεύτερη φάση, της έρευνας, στοχεύει στον εντοπισμό των εστιών μόλυνσης και την επιβεβαίωση τους μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί δημιουργώντας ένα σύστημα παρακολούθησης των εξάρσεων των επιδημιών σε διάφορες τοποθεσίες για την έγκαιρη ανταπόκριση των υπεύθυνων οργανισμών και τον περιορισμό τους. Η έρευνα της επιδημικής εξάρσης, είναι ένα δύσκολο στάδιο σε

περίπτωση πανδημίας. Ωστόσο, χρήσιμη θα μπορούσε να είναι η επικέντρωση σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως ο πληθυσμός-στόχος, η διαθεσιμότητα πόρων κλπ. Ο ρόλος των λειτουργιών της εφοδιαστικής αλυσίδας στην ανίχνευση και την επιβεβαίωση μιας επιδημικής έξαρσης αναφέρεται παρακάτω (Dasaklis et al., 2012):

- Παροχή όλων των κατάλληλων υλικών (όπως δελτία έκθεσης) σε νοσοκομεία, ιατρικές υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και τοπικές υπηρεσίες δημόσιας υγείας, που θα χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων σχετικά με τις αρχικές περιπτώσεις
- Κατάρτιση των κλινικών εργαζομένων για την αναγνώριση απροσδόκητων προτύπων εμφάνισης συγκεκριμένων ασθενειών και για την άμεση αναγνώριση και αναφορά ύποπτων περιστατικών με τη χρήση τυποποιημένων ορισμών
- Παροχή όλων των απαραίτητων βασικών προϊόντων και πόρων στην ομάδα αντιμετώπισης επιδημικών εξάρσεων που θα διευκολύνει και θα διασφαλίσει την επιχειρησιακή ανάπτυξή της
- Συλλογή δειγμάτων και επισήμανση τους
- Ασφαλής μεταφορά δειγμάτων στο κατάλληλο εργαστήριο (με χρήση κιβωτίων ή κουτιών διατήρησης θερμοκρασίας)
- Κατάλληλη αποθήκευση δειγμάτων στο εργαστήριο (εντός συγκεκριμένου εύρους θερμοκρασίας)
- Προμήθεια, χειρισμός, αποθήκευση και διανομή των εργαστηριακών προϊόντων, ταξινόμησή τους, διασφάλιση ποιότητας και έλεγχος ποιότητας, κ.λπ.

Στην τρίτη φάση, της απόκρισης, και αφού έχει επιβεβαιωθεί το ξέσπασμα μιας επιδημίας, πρέπει να γίνουν συγκεκριμένες ενέργειες για να σταματήσει γρήγορα η περαιτέρω εξάπλωση. Οι ενέργειες που αφορούν την εφοδιαστική αλυσίδα για τον περιορισμό της περαιτέρω εξάπλωσης μιας επιδημίας αναφέρονται παρακάτω (Dasaklis et al., 2012):

- Επιλογή των εγκαταστάσεων που θα χρησιμεύσουν ως σημεία διανομής
- Περιοδική επανεξέταση και ενημέρωση των απαιτούμενων προμηθειών και βασικών προϊόντων
- Μεταφορά/διανομή προμηθειών και εμπορευμάτων από κεντρικές αποθήκες στα τοπικά σημεία διανομής
- Προμήθεια εξοπλισμού/πόρων μετά την εξάντλησή τους
- Διάθεση ιατρικών προμηθειών, συμπληρωματικών υλικών και βασικών προϊόντων στο κοινό
- Δημιουργία ψυχρής αλυσίδας εφοδιασμού για την παροχή βασικών ιατρικών προμηθειών όπως εμβόλια
- Ημερήσια/εβδομαδιαία ικανότητα του διαθέσιμου προσωπικού να διεξάγει εκστρατείες μαζικού εμβολιασμού (για παράδειγμα ο μέγιστος αριθμός ατόμων που μπορούν να εμβολιάσουν ανά ημέρα)
- Προγραμματισμός των διαθέσιμων οχημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για σκοπούς μεταφοράς και διανομής
- Προσαρμογή της ικανότητας των εγκαταστάσεων υγειονομικής περίθαλψης να νοσηλεύουν τα μολυσμένα άτομα

- Διαχείριση των ασθενών στα κέντρα διαλογής (υλικοτεχνική υποστήριξη κλινικών ροών).

Η τέταρτη φάση, της αξιολόγησης, αφορά την περίοδο μετά την επιδημία και παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις ενέργειες και τα μέτρα που εφαρμόστηκαν καθ' όλη την διάρκεια της. Επίσης, αυτό το στάδιο βοηθά στην αναβάθμιση και την ενίσχυση των συνολικών ικανοτήτων διαχείρισης μιας επιδημίας, που θα μπορούσαν να είναι επωφελείς για την αντιμετώπιση μελλοντικών επιδημιών. Οι ενέργειες που αφορούν την εφοδιαστική αλυσίδα για την αξιολόγηση των μέτρων που εφαρμόστηκαν, αναφέρονται παρακάτω (Dasaklis et al., 2012):

- Εντοπισμός και αξιολόγηση πιθανών σημείων συμφόρησης ή καθυστερήσεων που παρεμπόδισαν την ανάπτυξη των διαθέσιμων ιατρικών προμηθειών
- Αξιολόγηση των χρονικών προθεσμιών που θα έπρεπε να τηρηθούν κατά τον έλεγχο της επιδημίας
- Παρακολούθηση των ασθενών για την αποτελεσματικότητα των αντιβιοτικών ή την ανοσοαπόκριση στο εμβόλιο
- Προσδιορισμός ασθενών που χρειάζονται τροποποίηση της δόσης ή εναλλακτικό θεραπευτικό σχήμα λόγω ανεπιθύμητων ενεργειών
- Ανάπτυξη δεικτών σχετικά με τις επιδόσεις των λειτουργιών ελέγχου της εφοδιαστικής
- Αξιολόγηση των ζητημάτων συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών
- Δημιουργία και λειτουργία διαδικασιών αποκατάστασης σε περίπτωση επιδημικών εκδηλώσεων μετά τις φυσικές καταστροφές.

2.3 Προβλήματα στην εφαρμογή των Διεθνών Κανονισμών Υγείας κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19

Τον Μάιο του 2016, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας δημιούργησε το Πρόγραμμα Έκτακτης Ανάγκης (WHO Health Emergencies Programme), το οποίο εγκρίθηκε από τα κράτη-μέλη του, με σκοπό να δημιουργήσει μια κοινή γραμμή μεταξύ των χωρών για την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Από την ίδρυση του προγράμματος, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει επενδύσει σημαντικά στην εμπειρογνωμοσύνη και τα πλεονεκτήματα ενός ευρέος φάσματος εταίρων και κρατών μελών. Καθ' όλη την διάρκεια της πανδημίας COVID-19, μέσω αυτού του προγράμματος διενεργήθηκαν συνεχείς αξιολογήσεις της κατάστασης και ανάλυση δεδομένων για την υποστήριξη των δραστηριοτήτων που προβλέπονταν από τους Διεθνείς Κανονισμούς Υγείας (International Health Regulations, 2005) αλλά και για την ενίσχυση της αντίδρασης σε μία κρίσιμη κατάσταση. Μέσω αυτών των αξιολογήσεων διαπιστώθηκαν αρκετά προβλήματα στην εφαρμογή των δράσεων, αποτελώντας ωστόσο το σημείο εκκίνησης συζητήσεων σχετικά με τον τρόπο βελτίωσης της ετοιμότητας και της ανταπόκρισης σε μελλοντικά γεγονότα.

Το σύστημα υγείας μιας χώρας είναι ένα αρκετά σημαντικό ζήτημα αφού σχετίζεται άμεσα με την ευημερία των ανθρώπων και των κοινοτήτων της. Η υγειονομική ασφάλεια πρέπει να θεωρείται η πρώτη γραμμή άμυνας έναντι καταστάσεων έκτακτης ανάγκης οποιουδήποτε τύπου. Ωστόσο, η πανδημία κατέδειξε ότι πολλές χώρες δεν είχαν επενδύσει αρκετά σε ολοκληρωμένα συστήματα ετοιμότητας και αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης για την προστασία της υγείας των ανθρώπων από εκδηλώσεις ασθενειών, φυσικές και ανθρωπογενείς καταστροφές, ένοπλες συγκρούσεις και άλλους κινδύνους (WHO, 2020). Αποτέλεσμα αυτού ήταν η έλλειψη φαρμάκων, ιατρικού εξοπλισμού και εκπαιδευμένου προσωπικού, φανερώνοντας έτσι ένα κενό στην ετοιμότητα των χωρών αλλά και στην ανθεκτικότητα των συστημάτων υγείας.

Αυτό δείχνει ότι πρέπει να επανεξεταστεί ο τρόπος οργάνωσης των υπηρεσιών δημόσιας υγείας και υγειονομικής περίθαλψης, έτσι ώστε να δημιουργηθούν συστήματα υγείας που είναι ανθεκτικά σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, μέσω δράσεων που περιλαμβάνουν τα ακόλουθα (WHO, 2020):

- Ενίσχυση των νοσοκομειακών δυνατοτήτων για την αντιμετώπιση σημαντικών εισροών ασθενών που συνδέονται με πανδημία μεγάλης κλίμακας (εξασφάλιση επαρκούς δυναμικότητας όσον αφορά τις μονάδες εντατικής θεραπείας και τον σχετικό ιατρικό εξοπλισμό, καταρτισμένο υγειονομικό προσωπικό και μέτρα πρόληψης και ελέγχου των λοιμώξεων)
- Παροχή προστατευτικού εξοπλισμού υψηλής ποιότητας για τους εργαζομένους στην υγεία στην πρώτη γραμμή και προγραμματισμός αυξημένης δυναμικότητας σε περίπτωση ταχέως αυξανόμενης ζήτησης για νοσηλεία, αλλά και για άλλες βασικές λειτουργίες αντίδρασης, όπως η ανίχνευση επαφών
- Εξοπλισμό διαγνωστικών εργαστηρίων και εκπαίδευση του προσωπικού τους
- Βελτίωση της επιτήρησης, της συλλογής δεδομένων και της διερεύνησης υποθέσεων
- Ενίσχυση των συστημάτων προμηθειών, των αλυσίδων εφοδιασμού και της επιχειρησιακής υποστήριξης
- Επιτάχυνση της έρευνας και των δοκιμών, εμβολίων και θεραπευτικών μεθόδων

Η ανταπόκριση των συστημάτων υγείας πρέπει επίσης να καλύπτει και τις υπόλοιπες βασικές υγειονομικές και κοινωνικές ανάγκες πέραν της COVID-19 και η υψηλή ετοιμότητα μπορεί να διασφαλίσει την προσαρμογή των συστημάτων υγείας στις ανάγκες του πληθυσμού. Η ικανότητα του συστήματος υγείας μιας χώρας αλλά και η κατανόηση των κινδύνων στους οποίους είναι επιρρεπής μπορεί να οδηγήσει στον προσδιορισμό αποτελεσματικών και ισορροπημένων δράσεων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι συνετή η τακτική δοκιμή των υφιστάμενων συστημάτων για την αντιμετώπιση πραγματικών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Οι χώρες πρέπει να είναι συνεχώς σε ετοιμότητα προκειμένου να ανταποκριθούν στις συνεχείς εξελίξεις που φέρνει η πανδημία καθώς και για μελλοντικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Δεδομένης της δυναμικής εξέλιξης της πανδημίας COVID-19 αλλά και της επαναλαμβανόμενης φύσης των πανδημιών, η ετοιμότητα θα πρέπει να τεθεί ως προτεραιότητα για όλες τις χώρες. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας και άλλοι παγκόσμιοι και περιφερειακοί οργανισμοί τόνισαν ότι οι χώρες πρέπει να

αναθεωρήσουν τα σχέδια αντιμετώπισης μιας πανδημίας μετά την πανδημία H1N1 το 2009. Ωστόσο, μόνο 15 από τα 53 Κράτη Μέλη αναθεώρησαν τα σχέδια τους για την πανδημία της γρίπης από το 2009 (WHO, 2020).

Ένα επίσης σημαντικό μέρος του σχεδιασμού της απόκρισης είναι η έγκαιρη ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένων μεταξύ των φορέων. Η διάθεση επαρκών πόρων και η εναρμονισμένη συνεργασία μεταξύ των θεσμικών οργάνων μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη ροή πληροφοριών χρησιμοποιώντας καινοτόμες προσεγγίσεις που θα επιτρέψουν την ανίχνευση των κρουσμάτων αλλά και τον περιορισμό τους. Το 2019, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας δημιούργησε μια παγκόσμια πλατφόρμα την οποία ονόμασε EPI-BRAIN (Epidemic Big Data Resource and Analytics Innovation Network, <https://www.epi-brain.com/>) χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη για την πρόβλεψη επιδημιών. Η πλατφόρμα επιτρέπει στους ειδικούς να συγχωνεύουν δεδομένα δημόσιας υγείας με δεδομένα από σύνθετους παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν την έναρξη μιας πανδημίας, όπως είναι οι ασθένειες ζώων, περιβαλλοντικοί παράγοντες, κ.λπ. Ως συνέχεια μιας τέτοιας προσπάθειας για την πρόβλεψη επιδημιών, θα πρέπει να δημιουργηθούν σύγχρονες πλατφόρμες για ανταλλαγή δεδομένων υγείας μεταξύ των χωρών αλλά και περαιτέρω πληροφοριών σχετικά με μέτρα που πρέπει να εφαρμόσει η κάθε μια, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι οι γνώσεις σχετικά με μια πανδημία θα φτάσουν σε όλες τις χώρες.

Κάθε χώρα έχει επενδύσει στην αντιμετώπιση της πανδημίας COVID-19 προσπαθώντας να μεγιστοποιήσει τα αποτελέσματα ως προς την υγεία και να ελαχιστοποιήσει ταυτόχρονα τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις στον πληθυσμό της. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας παρότρυνε τις χώρες να εφαρμόσουν μια κοινή γραμμή αντιμετώπισης για την εύρεση, την απομόνωση, τον έλεγχο και την αντιμετώπιση της κάθε περίπτωσης ώστε να σπάσουν οι αλυσίδες μετάδοσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα ήταν διαφορετικά σε κάθε χώρα ανάλογα με τις καταστάσεις και τα πλαίσια, καθώς συχνά έπρεπε να αναπτύσσονται προσωρινά σχέδια και συστάσεις ανάλογα με την περίπτωση. Μια πιο συνεπής και ευθυγραμμισμένη απόκριση μπορεί να συμβάλει στην αντιμετώπιση των προκλήσεων στον τομέα της υγείας της κάθε χώρας. Αυτό τονίζει την ανάγκη για αναθεώρηση των σχεδίων και των λειτουργιών στο πλαίσιο των Διεθνών Κανονισμών Υγείας του 2005 με σκοπό τον συντονισμό και την εναρμόνιση των παγκόσμιων δράσεων για την πρόληψη, την αντιμετώπιση και την ανάκαμψη από μια μελλοντική πανδημία.

Κεφάλαιο 3: Η διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας – Απειλή για την εξάπλωση του ιού

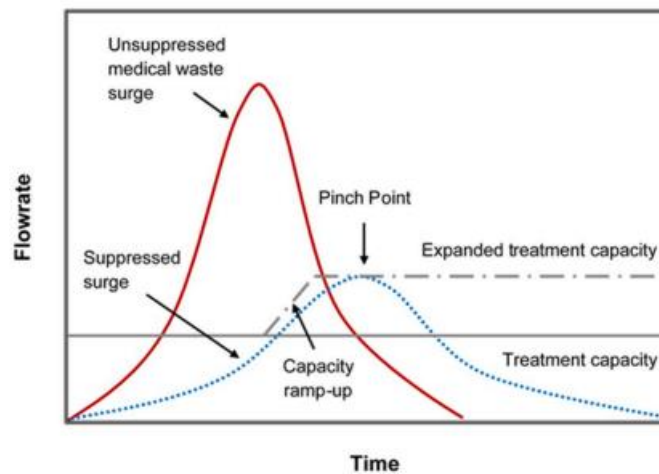
3.1 Στρατηγικές και προκλήσεις στη διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας κατά την πανδημία COVID-19

Η εμφάνιση της πανδημίας COVID-19 έφερε αρκετές αλλαγές στον τρόπο ζωής, δεδομένου ότι η χρήση εξοπλισμού ατομικής προστασίας, η χρήση αναλώσιμων σκευών αλλά και η αυξημένη ζήτηση για τρόφιμα και είδη παντοπωλείου συσκευασμένα σε πλαστικό είναι πλέον καθημερινότητα ως απόρροια του φόβου μετάδοσης του ιού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της πολυπλοκότητας ως προς τον τρόπο διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων. Το πλαστικό είναι ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά κατασκευής ιατρικού και προστατευτικού εξοπλισμού και η χρησιμότητα του είναι εμφανής για την προστασία της υγείας σε αυτή την κρίσιμη περίοδο. Ωστόσο, τα ανάμεικτα πλαστικά, όπως αυτά των масκών μιας χρήσης με στρώματα πλαστικών σε συνδυασμό με άλλα υλικά, αποτελούν επίσης μεγάλη απειλή για το περιβάλλον λόγω της χαμηλής ανακυκλωσιμότητάς τους (Vanapalli et al., 2021). Επιπλέον, αρκετά μολυσματικά πλαστικά απόβλητα όπως μάσκες, γάντια και προστατευτικά προσώπου θα μπορούσαν επίσης να προκαλέσουν μεγαλύτερη ζημιά με τη μετάδοση ιών, χωρίς κατάλληλη αποστείρωση (Vanapalli et al., 2021). Η αειφόρος διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας αποτελεί μία πρόκληση, καθώς η έλλειψη συντονισμένης διεθνούς στρατηγικής για την διαχείριση αυτού του εξοπλισμού μπορεί να επηρεάσει την πορεία και την εξέλιξη της πανδημίας. Συνεπώς, η ανεπάρκεια του σημερινού συστήματος διαχείρισης αποβλήτων θα μπορούσε να επιδεινώσει την κατάσταση της πανδημίας COVID-19.

Η αύξηση της παραγωγής και της διάθεσης εξοπλισμού ατομικής προστασίας δημιουργεί ισοδύναμη αύξηση στη ροή αποβλήτων, σε συνδυασμό με τους κινδύνους για την υγεία και το περιβάλλον κατά μήκος της αλυσίδας διαχείρισης αποβλήτων, ειδικά σε χώρες με ανεπτυγμένη υποδομή. Η Κίνα παρήγαγε περίπου 240 τόνους ιατρικών αποβλήτων την ημέρα στο αποκορύφωμα της πανδημίας στη Wuhan, έξι φορές περισσότερους από ότι πριν την έξαρση της πανδημίας. Ως εκ τούτου, η τοπική υπηρεσία διαχείρισης αποβλήτων της Wuhan δημιούργησε κινητούς αποτεφρωτήρες στην πόλη για την απόρριψη αυτών των άνευ προηγουμένου ποσοτήτων χρησιμοποιημένων масκών προσώπου, γαντιών αλλά και μολυσμένου εξοπλισμού μιας χρήσης (Singh et al., 2020).

Το γράφημα στην Εικόνα 2 απεικονίζει την αντιστοίχιση της προσφοράς και της ζήτησης για ιατρική επεξεργασία αποβλήτων κατά τη διάρκεια της πανδημίας. Η αναμενόμενη ποσότητα αποβλήτων υπερβαίνει κατά πολύ τη διαθέσιμη δυναμικότητα για την επεξεργασία αποβλήτων, δεδομένου ότι τα συστήματα αυτά σχεδιάστηκαν για ποσότητες αποβλήτων που παράγονται κατά τις συνήθεις λειτουργίες. Ένα σημείο όπου εμφανίζεται ή είναι πιθανό να εμφανιστεί συμφόρηση (Pinch Point) δημιουργείται όταν η διευρυμένη δυναμικότητα μεγιστοποιείται και εξασφαλίζει ότι αντιμετωπίζονται οι κίνδυνοι από μολυσμένα παθογόνα απόβλητα.

Ένα πλεονέκτημα εδώ είναι η ικανότητα διαχείρισης η οποία θα μείνει στο ίδιο επίπεδο μετά την υποχώρηση της πανδημίας (Klemes et al., 2020).

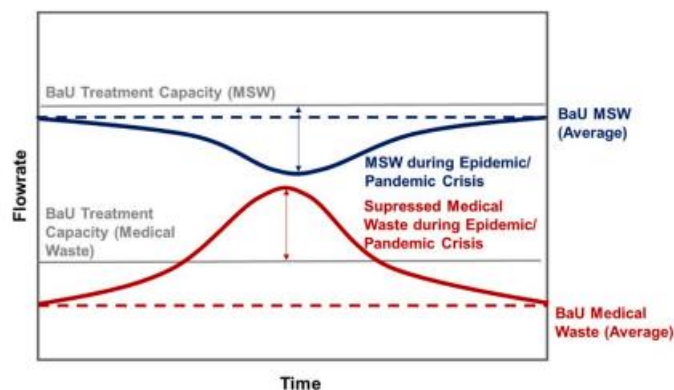


Εικόνα 2: Καμπύλη ρυθμού ροής ιατρικών αποβλήτων κατά την πανδημία COVID-19 (Klemes et al., 2020)

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων είναι η ανακύκλωση, η αποτέφρωση και η υγειονομική ταφή. Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές δεν αρκούν για τον πλήρη περιορισμό του προβλήματος, πόσο μάλλον με την αυξημένη παραγωγή αποβλήτων κατά την διάρκεια της πανδημίας COVID-19. Επιπλέον, η μείωση του προσωπικού λόγω του φόβου μετάδοσης του ιού κατά την συλλογή και διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων και η περιορισμένη μεταφορά τους, έχουν εντείνει το πρόβλημα, προκαλώντας αδυναμία στην πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού της βιομηχανίας ανακύκλωσης.

Η ανακύκλωση θεωρείται σχετικά φιλική προς το περιβάλλον, όμως η επεξεργασία, ο διαχωρισμός και τα πρόσθετα που περιλαμβάνει αυτή η διαδικασία, καθιστούν την αποτέφρωση μια πιο αποτελεσματική λύση στην αντιμετώπιση διαφόρων μη ανακυκλώσιμων πλαστικών αποβλήτων. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει δώσει εντολή για την αποτέφρωση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας και άλλων μολυσματικών και επικίνδυνων αποβλήτων, ειδικά κατασκευασμένων από πλαστικό, με την οποία όμως αυξήθηκε ο φόρτος εργασίας στις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης (WHO, 2017). Πέρα από το γεγονός ότι οι υπάρχουσες υποδομές αποτέφρωσης δεν θα μπορούσαν να υποστηρίξουν την τεράστια αύξηση της παραγωγής πλαστικών αποβλήτων, σοβαρή ανησυχία προκαλεί η απελευθέρωση επικίνδυνων αερίων κατά τη διαδικασία αυτή. Από την άλλη πλευρά, η υγειονομική ταφή είναι ένας τρόπος διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων που κυριαρχεί, ειδικά στις ανεπτυγμένες χώρες. Αν και η αποτέφρωση συνίσταται για την ανάκτηση ενέργειας από το υλικό, η υγειονομική ταφή συχνά είναι πιο διαδεδομένη από την πλευρά της διαχείρισης των αποβλήτων. Ωστόσο, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος των αναπτυσσόμενων και των υποανάπτυκτων χωρών εξακολουθεί να ακολουθεί ανθυγιεινές απορρίψεις αποβλήτων, αυτό οδηγεί σε τεράστιους περιορισμούς χώρου, απελευθέρωση επιβλαβών χημικών ουσιών, ακόμα και πυρκαγιές, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση επιβλαβών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως διοξίνες (Vanapalli et al., 2021). Ως

αποτέλεσμα της αύξησης των πλαστικών αποβλήτων και των περιορισμών στη διαδικασία της αποτέφρωσης κατά τη διάρκεια της πανδημίας, προκαλείται αυξημένος φόρτος στους χώρους απόρριψης και οι χώροι υγειονομικής ταφής ξεπερνούν την παραγωγική τους δυναμικότητα. Το σχήμα στην Εικόνα 3 δείχνει τις τάσεις ροής των ιατρικών αποβλήτων και των στερεών αστικών αποβλήτων (Municipal Solid Waste) σε σύγκριση με την ικανότητα επεξεργασίας υπό κανονικές συνθήκες (Business as Usual) και κατά τη διάρκεια της πανδημίας.



Εικόνα 3: Τάση ροής των ιατρικών αποβλήτων και των στερεών αστικών αποβλήτων (Klimes et al., 2020)

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας ορίζει τα απόβλητα που παράγονται από ιατρικές ή ερευνητικές εγκαταστάσεις κατά τη διάρκεια οποιωνδήποτε ιατρικών δραστηριοτήτων ως βιοϊατρικά απόβλητα και απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης. Στην ίδια κατηγορία κατατάσσονται και τα απόβλητα που παράγονται κατά τη διάρκεια της υγειονομικής περίθαλψης στο σπίτι. Μελέτες αναφέρουν ότι μία από τις κύριες πηγές μόλυνσης είναι μέσω τυχαίας επαφής με τα μολυσματικά αντικείμενα που έχουν απορριφθεί στο σημείο παραγωγής τους. Σε ανεπτυγμένες χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο και τις Ηνωμένες Πολιτείες, τα νοσοκομεία δεσμεύονται νομικά να αποτρέψουν λοιμώξεις λόγω κακής διαχείρισης των αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης (Sharma et al., 2020). Πολλές από τις ιατρικές εγκαταστάσεις είναι εξοπλισμένες με υποδομές για αποστείρωση με ατμό (κλίβανος), επεξεργασία με βάση την ενέργεια (μικροκύματα, ραδιοκύματα), αποτέφρωση, χημική απολύμανση κ.λπ., ανάλογα με τη ρυθμιστική αρχή του κράτους. Ωστόσο, αυτή η τεράστια αύξηση της παραγωγής βιοϊατρικών αποβλήτων με την καθημερινή χρήση μεγάλου όγκου εξοπλισμού ατομικής προστασίας έχει δημιουργήσει πρόβλημα στα υφιστάμενα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων. Επιπλέον, η επέκταση της υγειονομικής περίθαλψης σε προσωρινά νοσοκομεία, κέντρα απομόνωσης, στρατόπεδα απομόνωσης, σπίτια σε καραντίνα και κέντρα δοκιμών, αποτελεί τεράστια πρόκληση όσον αφορά την τήρηση πρωτοκόλλων σχετικών με τον διαχωρισμό και την αποθήκευση αποβλήτων. Η έλλειψη εκπαιδευμένου υγειονομικού προσωπικού περιορίζει επίσης τη διαλογή και την επιστημονική διάθεση βιοϊατρικών αποβλήτων για τους τοπικούς αστικούς φορείς. Οι περιορισμοί χωρητικότητας των αποτεφρωτήρων και των κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας οδηγούν σε

παράνομη απόθεση των αποβλήτων σε περιστασιακές περιοχές, ρέματα, κ.λπ., γεγονός που εγείρει ανησυχίες για την δημόσια υγεία (Sharma et al., 2020). Επίσης, η ικανότητα του ιού να παραμένει ενεργός σε επιφάνειες για μεγάλο χρονικό διάστημα επιβάλλει την επανεξέταση των προτύπων που επιβάλλουν γενικό διαχωρισμό των βιοϊατρικών αποβλήτων. Πρέπει να αναγνωριστεί ότι οι αυστηρές συνθήκες υγιεινής αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του ελέγχου των κινδύνων μόλυνσης και την πρόληψης εμφάνισης νέων εστιών (Sharma et al., 2020).

3.2 Πρακτικές και επικαιροποιημένες κατευθυντήριες γραμμές για τη διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας

Ο εξοπλισμός ατομικής προστασίας θεωρείται αναλώσιμος μετά από μια σύντομη χρήση. Λόγω της ανησυχίας για πιθανή μετάδοση ιών από την επιφάνεια των μασκών προσώπου ή των γαντιών και της εκτεταμένης χρήσης τους, η διαχείριση αυτού του εξοπλισμού έχει γίνει μια πρόκληση. Η διαχείριση του θα πρέπει να συνδυάζει μεθόδους αποθήκευσης, συλλογής, μεταφοράς και επεξεργασίας καθώς και την εφαρμογή ενός συστήματος συλλογής κατά την οποία απαιτείται η συνεργασία μεταξύ τοπικών κυβερνήσεων, φορέων, εταιρειών συλλογής απορριμμάτων αλλά και του κάθε ατόμου ξεχωριστά.

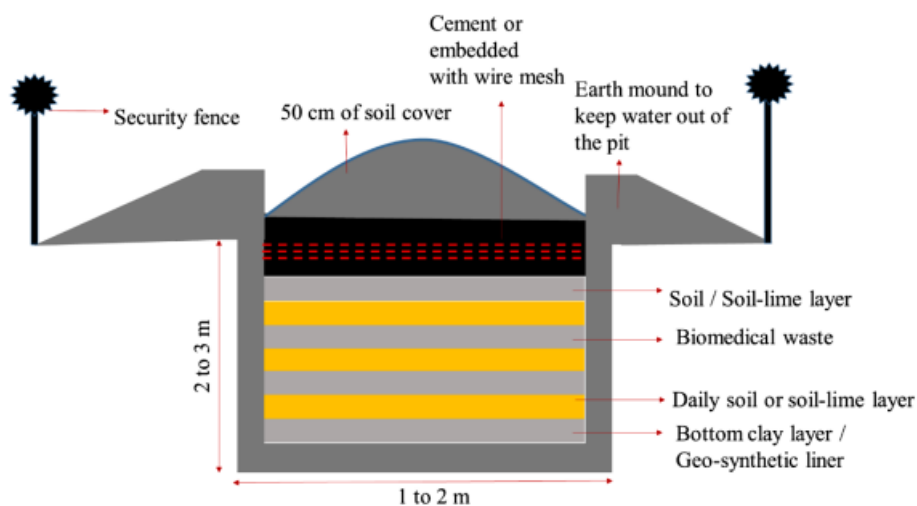
Πρόσφατα η Κεντρική Επιτροπή Ελέγχου Ρύπανσης της Ινδίας (CPCB - Central Pollution Control Board), ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, η Υπηρεσία Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας της Αμερικής (OSHA - U.S. Occupational Safety and Health Administration), η Ευρωπαϊκή Ένωση και άλλοι οργανισμοί και χώρες, εξέδωσαν ένα σύνολο κατευθυντήριων γραμμών για την αντιμετώπιση των αποβλήτων που σχετίζονται με την πανδημία COVID-19. Οι επικαιροποιημένες κατευθυντήριες γραμμές αποτελούν σχέδια έκτακτης ανάγκης προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δεν προστίθενται άλλοι κίνδυνοι κατά τη διάρκεια της πανδημίας. Οι παρούσες οδηγίες πρέπει να ακολουθούνται επιπλέον των κανόνων που αφορούν τη διαχείριση των βιοϊατρικών αποβλήτων. Οι εν λόγω κατευθυντήριες γραμμές, αν και ενδέχεται να επικαιροποιηθούν αν κριθεί απαραίτητο, βασίζονται στις τρέχουσες γνώσεις για την πανδημία COVID-19 και στις υφιστάμενες πρακτικές για τη διαχείριση των μολυσμένων αποβλήτων που παράγονται στα νοσοκομεία (Sharma et al., 2020).

Η οδηγία του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας είναι πως όλα τα υγειονομικά απόβλητα που παράγονται κατά τη διάρκεια περίθαλψης ασθενών που πάσχουν από COVID-19, θα πρέπει να συλλέγονται με ασφάλεια, σε καθορισμένους κάδους και σακούλες, να υποβάλλονται σε επεξεργασία και στη συνέχεια να απορρίπτονται με ασφάλεια. Μόνο με κατάλληλη διαχείριση και επεξεργασία εντός των εγκαταστάσεων μπορούν να μεταφερθούν τα απόβλητα εκτός των εγκαταστάσεων. Επιπλέον, όλοι οι εργαζόμενοι που εμπλέκονται στη διαχείριση αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης θα πρέπει να φορούν τον κατάλληλο εξοπλισμό ατομικής προστασίας (μπότες, ποδιά, χοντρά γάντια, μάσκα και γυαλιά ή ασπίδα προσώπου) και να διατηρούν την υγιεινή των χεριών τους (WHO, 2020). Οι συστάσεις που έκανε η Ευρωπαϊκή Ένωση αφορούσαν τη διαχείριση των οικιακών αποβλήτων σε

περίπτωση που υπάρχει ασθενής, με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό ατομικής προστασίας να απορρίπτεται ξεχωριστά και με προσοχή σε διπλές σακούλες, χωρίς έτσι να απαιτείται καμία ειδική δραστηριότητα ή άλλη μέθοδος διάθεσης. Η Υπηρεσία Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας των ΗΠΑ (OSHA) έχει δηλώσει ότι τα απόβλητα που είναι ύποπτα ή είναι γνωστό ότι έχουν μολυνθεί από COVID-19 δεν απαιτούν ειδική διαχείριση πέραν της διαδικασίας που ήδη ακολουθείται για την προστασία των εργαζομένων από τους κινδύνους που αντιμετωπίζουν κατά τη διάρκεια των συνηθισμένων εργασιών τους στη διαχείριση στερεών αποβλήτων και λυμάτων (Sharma et al., 2020). Η Κεντρική Επιτροπή Ελέγχου Ρύπανσης (CPCB) της Ινδίας εξέδωσε χωριστές κατευθυντήριες γραμμές για τον χειρισμό, την επεξεργασία και τη διάθεση βιοϊατρικών αποβλήτων που παράγονται κατά την επεξεργασία, διάγνωση ή καραντίνα ασθενών με COVID-19, οι οποίες παρέχουν καθοδήγηση για τη διαχείριση τους. Σύμφωνα με αυτές τις οδηγίες, ο μεταχειρισμένος εξοπλισμός ατομικής προστασίας, όπως μάσκες, γάντια, γυαλιά, κλπ. που παράγεται σε εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης θα διαχωρίζεται και θα αποστέλλεται σε κοινές εγκαταστάσεις για διάθεση σύμφωνα με τους κανόνες διαχείρισης βιοϊατρικών αποβλήτων του 2016 (BMW Rules). Ωστόσο, ο μεταχειρισμένος εξοπλισμός που παράγεται από οικίες, εμπορικά καταστήματα, ιδρύματα κλπ. απαιτείται να αποθηκεύεται ξεχωριστά για τουλάχιστον 72 ώρες πριν τη διάθεση μαζί με τα στερεά απόβλητα. Οι κατευθυντήριες γραμμές έχουν διανεμηθεί σε όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς και εκδόθηκαν ειδικές οδηγίες σε όλα τα Κρατικά Συμβούλια Ελέγχου της Ρύπανσης (SPCBs)/ Επιτροπές Ελέγχου της Ρύπανσης (PCCs) για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης. Το Υπουργείο Οικολογίας και Περιβάλλοντος της Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας εξέδωσε τον «Ιατρικό Οδηγό Διαχείρισης και Τεχνικής Διάθεσης Επείγοντων Αποβλήτων και Ιατρικών Αποβλήτων που έχουν μολυνθεί από την COVID-19», ο οποίος αναφέρει ότι τα μολυσματικά ιατρικά απόβλητα που παράγονται κατά την πρόληψη και την αντιμετώπιση περιστατικών πνευμονίας πρέπει να συσκευάζονται αυστηρά σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα. Οι μονάδες διάθεσης ιατρικών αποβλήτων πρέπει να δίνουν προτεραιότητα στη συλλογή και διάθεση των μολυσμένων ιατρικών αποβλήτων που παράγονται κατά την πρόληψη και την αντιμετώπιση επιδημιών. Στην Αυστρία, για να αποφευχθεί η επιβάρυνση των δημοτικών συστημάτων αποβλήτων, οι πολίτες κλήθηκαν να μειώσουν την παραγωγή των αποβλήτων καθώς και να τα διαχωρίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα. Η Βρετανία έχει δημοσιεύσει στις αρμόδιες αρχές και φορείς συλλογής αποβλήτων δηλώσεις σχετικά με την ιεράρχηση των ροών αποβλήτων, την επέκταση της ικανότητας προσωρινής αποθήκευσης τους, τον διαχωρισμό τους, την προσαρμογή των αποτεφρωτήρων αλλά και την ενημέρωση των πολιτών.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας το 2014 είχε προτείνει σε περιπτώσεις χωρών χαμηλότερων εισοδημάτων όπου η διαχείριση των βιοϊατρικών αποβλήτων δεν είναι προηγμένη, ότι η ταφή των συλλεγόμενων αποβλήτων σε στενό λάκκο (2x3 μ.) με πήλινη ή γεω-συνθετική επένδυση στο κάτω μέρος, μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης όπως η πανδημία COVID-19, για την ασφαλή διάθεση των νοσοκομειακών αποβλήτων. Μετά την απόθεση των αποβλήτων στον λάκκο, η κάλυψη θα πρέπει να γίνεται με χώμα ή ένα μείγμα χώματος-ασβέστη. Το ανώτερο λεπτό στρώμα του λάκκου θα πρέπει να καλύπτεται από τσιμέντο ή τσιμέντο με

ενσωματωμένο συρματόπλεγμα. Πάνω από το στρώμα τσιμέντου με συρματόπλεγμα, πρέπει να τοποθετηθεί επίσης κάλυψη 50 εκ. χώματος. Οι περιοχές που έχουν τέτοιους λάκκους θα πρέπει να είναι απομονωμένες, με συρμάτινη περίφραξη για να κρατούνται μακριά άνθρωποι ή ζώα. Αυτός ο τρόπος ταφής μολυσματικών αποβλήτων μπορεί να εξεταστεί σε περίοδο ξεσπάσματος μιας πανδημίας όταν ο όγκος των αποβλήτων που δημιουργούνται υπερβαίνει τη μέγιστη ικανότητα αποτέφρωσης (Sharma, et al., 2020) (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Κατασκευή λάκκου για την ταφή βιοϊατρικών αποβλήτων κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης (Sharma et al., 2020)

Η τρέχουσα πανδημία έχει θέσει αρκετές προκλήσεις στις πρακτικές και διαδικασίες διαχείρισης των βιοϊατρικών αποβλήτων, με τις κυβερνήσεις των χωρών να εντοπίζουν τη σημαντικότητα της κατάστασης και να λαμβάνουν μέτρα για την ασφάλεια και την υγεία. Η διαχείριση των αστικών απορριμμάτων είναι μια ουσιαστική και απαραίτητη υπηρεσία. Οι υπηρεσίες διαχείρισης τους παίζουν βασικό ρόλο στον περιορισμό της μετάδοσης ασθενειών αλλά σπάνια αναφέρονται στην αντιμετώπιση κρίσεων δημόσιας υγείας.

3.3 Εναλλακτικές στρατηγικές για βιώσιμη διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας

Μια πιθανή λύση για την επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων βιοϊατρικών αποβλήτων είναι η θερμική επεξεργασία μέσω της οποίας ανακτάται ενέργεια. Εκτός από την μείωση του όγκου από 80 έως 95% που μπορεί να αποφέρει αυτή η διαδικασία, η

εξυγίανση (τα απόβλητα αποσυντίθενται σε θερμοκρασία N 850 °C), η αδρανοποίηση των επικίνδυνων ουσιών και η εξοικονόμηση πόρων είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα ενός συστήματος θερμικής επεξεργασίας (Kulkarni et al., 2020). Ωστόσο, ειδικά για τις αναπτυσσόμενες χώρες, κάτι τέτοιο μπορεί να απαιτήσει προηγμένο σχεδιασμό εγκαταστάσεων με μέτρια έως υψηλή πολυπλοκότητα και μεγάλο κόστος κεφαλαίου.

Με περιορισμένες διαθέσιμες λύσεις, υπάρχει ουσιαστική ανάγκη για την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών στο υπάρχον σύστημα διαχείρισης αποβλήτων με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας των παλαιών τεχνολογιών και διεργασιών και την αύξηση της ικανότητας διαχείρισης μεγαλύτερου όγκου. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση αυτοματοποιημένων συστημάτων για τον διαχωρισμό των αποβλήτων θα μείωνε τον κίνδυνο για την υγεία και την ασφάλεια του εμπλεκόμενου εργατικού δυναμικού, βελτιώνοντας ταυτόχρονα όχι μόνο την αποδοτικότητα και την ταχύτητα της ανακύκλωσης αλλά και την αξία των ανακυκλωμένων προϊόντων.

Η επαναχρησιμοποίηση μασκών μιας χρήσης υψηλής αναπνευστικής προστασίας έχει εξεταστεί ως λύση για την αύξηση των περιορισμένων αποθεμάτων από παρόχους και εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης. Σε μεγάλο αστικό νοσοκομείο του Καναδά αξιολογήθηκε η επαναχρησιμοποίηση μασκών υψηλής αναπνευστικής προστασίας μετά από 2-8 ώρες χρήσης, αποστείρωση σε κλίβανο και δοκιμή. Οι χρησιμοποιημένες μάσκες πέρασαν την πρώτη δοκιμή μετά από αποστείρωση σε κλίβανο και το 86% των μασκών πέρασαν τον δεύτερο κύκλο επαναχρησιμοποίησης και αποστείρωσης. Για την ανακύκλωση 200-1000 μασκών καθημερινά, αναπτύχθηκαν διαδικασίες συλλογής και αποστείρωσης για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου μετάδοσης μέσω σωματιδίων κατά τη διαχείριση τους καθώς και διαδικασίες αξιολόγησης για την απόρριψη μασκών με εμφανή φθορά. Το ποσοστό των μασκών που ανακτήθηκαν κυμάνθηκε από 49% έως 80% σε 12 κύκλους συλλογής. Το συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι είναι εφικτή η επαναχρησιμοποίηση μασκών υψηλής αναπνευστικής προστασίας και πως ακόμα και με έναν κύκλο χρήσης, αποστείρωσης και επαναχρησιμοποίησης τα αποθέματα μπορούν να αυξηθούν κατά 66%.

Οι διαδικασίες που έχουν αναφερθεί σε έρευνες για την επαναχρησιμοποίηση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας επικεντρώνονται στην εφαρμογή τεχνικών ήπιας διαχείρισης που επιδιώκουν να επιτύχουν ισορροπία μεταξύ της εξασφάλισης της μείωσης του ιικού φορτίου και τη διασφάλιση της λειτουργικότητας του εξοπλισμού μετά την επεξεργασία. Η πλειοψηφία των προσεγγίσεων έχουν υιοθετήσει την αποστείρωση με την χρήση υπεροξειδίου του υδρογόνου (VH_2O_2), η οποία είναι η πιο κοινή διαδικασία αποστείρωσης χαμηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται σήμερα. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου (VH_2O_2), που χρησιμοποιείται μόνο του ή σε συνδυασμό με όζον, έχει χρησιμοποιηθεί για την απολύμανση υψηλής απόδοσης και την επαναχρησιμοποίηση σύνθετου εξοπλισμού ατομικής προστασίας όπως οι μάσκες υψηλής αναπνευστικής προστασίας και έχει πιστοποιηθεί υπό την έγκριση έκτακτης χρήσης από την Αμερικανική Υπηρεσία Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA), προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι ελλείψεις σε προμήθειες κατά την πανδημία COVID-19.

Ορισμένες μελέτες έχουν αναφερθεί στη χρήση διαφορετικών τεχνικών θέρμανσης για την επεξεργασία του εξοπλισμού ατομικής προστασίας. Η πρόκληση σε αυτές τις

θερμικές επεξεργασίες είναι η πλήρης εξάλειψη του ιού χωρίς να αλλοιωθεί η δομή του εξοπλισμού. Η Ισπανική Εταιρεία Προληπτικής Ιατρικής, Δημόσιας Υγείας και Υγιεινής συνιστά τη χρήση ξηρής θερμότητας στους 70 °C για 30 λεπτά σε κλίβανο για την αδρανοποίηση του ιού στην επιφάνεια του εξοπλισμού. Ωστόσο, υπάρχει γενική έλλειψη πληροφοριών σχετικά με την αλλοίωση του εξοπλισμού λόγω της ξηρής θερμότητας (Rowan and Laffey, 2021). Το Κέντρο Ελέγχου και Πρόληψης Ασθενειών (CDC) δήλωσε ότι, με βάση την περιορισμένη έρευνα που ήταν διαθέσιμη από τον Απρίλιο του 2020, η υγρή θερμότητα (διαδικασία κατά την οποία θερμαινόμενος ατμός υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την αποστείρωση ενός αντικειμένου) είναι μια πιθανή μέθοδος πολλά υποσχόμενη για την απολύμανση των μασκών. Το Εθνικό Ινστιτούτο Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας (2020) του CDC επισήμανε ότι πριν από τη χρήση οποιασδήποτε μεθόδου απολύμανσης, θα πρέπει να αξιολογείται για την ικανότητά της να διατηρεί την ακεραιότητα του φίλτρου της μάσκας, τα χαρακτηριστικά προσαρμογής που επιτυγχάνονται πριν από την απολύμανση και την ασφάλεια για τον χρήστη (Rowan and Laffey, 2021). Επίσης, σημειώθηκε ότι ένας περιορισμός στη μέθοδο της θερμότητας είναι η αβεβαιότητα της αποτελεσματικότητας απολύμανσης για διάφορα παθογόνα, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου ότι ενδέχεται να υπάρχουν περισσότεροι από ένας αναπνευστικοί ιοί ή παθογόνοι παράγοντες σε μολυσμένες μάσκες στο περιβάλλον υγειονομικής περίθαλψης.

Επιπλέον, άλλες μελέτες επικεντρώθηκαν σε μεθόδους όπως η χρήση όζοντος, οξειδίου του αιθυλενίου αλλά και χλωρίνης για την απολύμανση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας. Όμως τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών έδειξαν ότι εκτός από την αλλοίωση της δομής του υλικού του εξοπλισμού, έστω και σε μικρή κλίμακα, η χρήση αυτών των μεθόδων μπορεί να δημιουργούσε επιπτώσεις στην υγεία του χρήστη. Οι διαδικασίες υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) φωτός, ιδιαίτερα χρησιμοποιώντας μήκος κύματος UVC, έχουν επίσης αναφερθεί ως δυνητικά κατάλληλη τεχνολογία απολύμανσης, αλλά αυτή η τεχνολογία είναι απίθανο να απενεργοποιήσει τον ιό SARS-CoV-2 αν αυτός διαπερνά χαμηλότερα στρώματα υλικού του εξοπλισμού.

Πολλές χώρες έχουν επιτρέψει την απολύμανση και την επαναχρησιμοποίηση εξοπλισμού ατομικής προστασίας αφήνοντας την απόφαση στους υπεύθυνους υπηρεσιών υγείας. Υπάρχει μεγάλη ανάγκη να αναπτυχθούν εναλλακτικές λύσεις και στρατηγικές για την επαναχρησιμοποίηση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας, προκειμένου να επιτευχθεί μια ολιστική κατανόηση των ελλείψεων στην αλυσίδα εφοδιασμού κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19 αλλά και για μελλοντικές πανδημίες.

3.4 Προτάσεις – Συστάσεις

Κατά την πανδημία COVID-19 αυξήθηκε σημαντικά η χρήση πλαστικών λόγω της αυξημένης ζήτησης για εξοπλισμό ατομικής προστασίας (π.χ. μάσκες, γάντια κ.λπ.)

και έγινε εμφανής η ευθραυστότητα του συστήματος όσον αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων αλλά και οι ελλειπείς πολιτικές μείωσης του πλαστικού λόγω των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων τους. Οι πανδημίες επαναλαμβάνονται σε όλη την ανθρώπινη ιστορία και η αναζήτηση βιώσιμων λύσεων τίθεται ως προτεραιότητα (Silva et al., 2020). Αυτό απαιτεί τη συνεργασία των ενδιαφερόμενων μερών και των κυβερνήσεων με την ακαδημαϊκή και ερευνητική βιομηχανία για να επανεξεταστεί το σύστημα σχεδιασμού και διαχείρισης των πλαστικών για τη μετάβαση σε ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τα πλαστικά σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής τους, δηλαδή από το σχεδιασμό και την παραγωγή έως το τέλος του κύκλου ζωής, αντί να βελτιστοποιεί ανεξάρτητα κάθε στάδιο. Για την αναμόρφωση του τομέα διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων είναι αναγκαίο να γίνουν οι απαραίτητες θεσμικές αλλαγές και δεδομένων των μείζονων περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκλήθηκαν κατά την πανδημία COVID-19, προτείνονται οι ακόλουθες ενέργειες:

Βελτιστοποίηση της διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων

Για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εργαλείων βελτιστοποίησης και λήψης αποφάσεων με στόχο την αύξηση του αριθμού των εγκαταστάσεων διάθεσης αποβλήτων, την ενίσχυση των ήδη υπαρχόντων υποδομών και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών αξιοποίησης αποβλήτων (πυρόλυση, αεριοποίηση, υδροθερμική ανθρακοποίηση κ.λπ.). Μπορούν να παρέχονται ειδικές έγχρωμες σακούλες από την τοπική αρχή στα νοικοκυριά για την απόρριψη του εξοπλισμού ατομικής προστασίας (μάσκες, γάντια) σε σφραγισμένους σάκους, γεγονός που τα καθιστά εύκολα για διαχωρισμό και επεξεργασία μαζί με βιοϊατρικά απόβλητα. Ειδικοί χρωματιστοί κάδοι μπορούν να παρέχονται σε χώρους της κοινότητας για τη βελτίωση της συλλογής αυτών των αποβλήτων. Επίσης, η υιοθέτηση μοντέλων κυκλικής οικονομίας στον τομέα της διαχείρισης στερεών αποβλήτων όχι μόνο θα διευκολύνει την εκτροπή των συλλεγόμενων αποβλήτων από χώρους διάθεσης σε μονάδες ανακύκλωσης αλλά θα βοηθήσει επίσης σε πρώτη φάση στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων. Τα μοντέλα κυκλικής οικονομίας βοηθούν στη διατήρηση περισσότερων πόρων στον κύκλο παραγωγής και κατανάλωσης, μειώνοντας έτσι τη συνολική παραγωγή αποβλήτων. Αρκετές χώρες με βάση το νομικό τους πλαίσιο, ανέπτυξαν στρατηγικές διαχείρισης των αποβλήτων κατά την πανδημία. Συνεπώς, ένα εθνικό πλαίσιο πολιτικής με κανονισμούς και τεχνικές κατευθυντήριες γραμμές αποτελεί βασικό στοιχείο για ένα επιτυχημένο και βιώσιμο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης.

Κοινωνικοί παράγοντες – Εκπαίδευση

Η απλή παροχή πληροφοριών μέσω εκστρατειών ενημέρωσης είναι απίθανο να αλλάξει την ανθρώπινη συμπεριφορά προς το ζήτημα της ανακύκλωσης. Ωστόσο, η αύξηση της δημόσιας προβολής μέσω μιας εκστρατείας στα μέσα ενημέρωσης μπορεί να επηρεάσει έμμεσα την κοινωνική συμπεριφορά για την αντιμετώπιση της δυσπιστίας για την υγιεινή των επαναχρησιμοποιούμενων και ανακυκλωμένων προϊόντων και την ευαισθητοποίηση του κοινού κατά της αντίληψης του πλαστικού

μίας χρήσης ως προστασίας και όχι ως προβλήματος. Η ενθάρρυνση του διαχωρισμού των αποβλήτων μέσω οικονομικών κινήτρων στη φορολογία και η ατομική ή κοινοτική αναγνώριση (στα μέσα μαζικής ενημέρωσης/εφημερίδες) για τη συνεισφορά τους μπορεί να βοηθήσει στην απόκτηση καθαρών και ομοιογενών ροών πλαστικών αποβλήτων. Επίσης, το σύστημα θα πρέπει να οικοδομηθεί για τη διάθεση περισσότερων πόρων για την εκπαίδευση των πολιτών σχετικά με την περιβαλλοντική επιστήμη, δίνοντας έμφαση στη ρύπανση από τα πλαστικά και τις περιβαλλοντικές συνέπειες που μπορεί να αποφέρει.

Ανάπτυξη νέων τεχνολογιών

Θα πρέπει να γίνει εστίαση στην ανάπτυξη νέων και βιώσιμων τεχνολογιών για την ανακύκλωση μεικτών και άλλων σύνθετων μορφών πλαστικών. Θα πρέπει να διαμορφωθούν και να εφαρμοστούν αποτελεσματικά πολιτικές παροχής κινήτρων που ενθαρρύνουν τα ομοιογενή πλαστικά, τα φιλικά προς το περιβάλλον βιοπλαστικά και τις κυκλικές τεχνολογίες. Η παραγωγή πιο οικολογικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των βιοπλαστικών και των βιοδιασπώμενων υλικών με υψηλότερη ανακυκλωσιμότητα, θα πρέπει να ενθαρρυνθεί και να επιβραβευθεί.

Επενδύσεις

Η ενθάρρυνση των επενδύσεων για την ανάπτυξη κυκλικών τεχνολογιών όπως η ανακύκλωση πρώτων υλών μπορεί να πυροδοτήσει καινοτομίες στον υπάρχοντα σχεδιασμό προϊόντων με σκοπό την πολλαπλή χρήση τους μετά την απολύμανση. Επίσης, για να προωθηθεί η επιχειρηματική οδός στη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων και να ξεκινήσει η μύηση στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων, οι εταιρείες πρέπει να ενθαρρυνθούν να τις χρηματοδοτήσουν. Γίνεται αντιληπτό ότι η φύση της κρίσης COVID-19 είναι διαφορετική από οποιαδήποτε πρόσφατη οικονομική κρίση στον κόσμο. Οι απαιτούμενες αλλαγές θα ήταν δυνατές μόνο αν υπάρξει αναδιάρθρωση των πολιτικών, κοινωνική ευαισθητοποίηση ως προς την ανακύκλωση και ενθάρρυνση ως προς την χρήση βιώσιμων προϊόντων. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής και οι επιχειρηματίες θα πρέπει να θεωρήσουν την τρέχουσα κρίση ως ευκαιρία για την επίλυση του ζητήματος των στερεών αποβλήτων, όχι αντιμετωπίζοντάς το απλώς ως περιβαλλοντικό πρόβλημα αλλά ως οικονομική προοπτική για την οποία απαιτούνται νέα βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα βασισμένα στην αρχή της κυκλικής οικονομίας (Sharma et al., 2020).

Κεφάλαιο 4: Αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα: Το μέσο για την αντιμετώπιση της εξάπλωσης του ιού

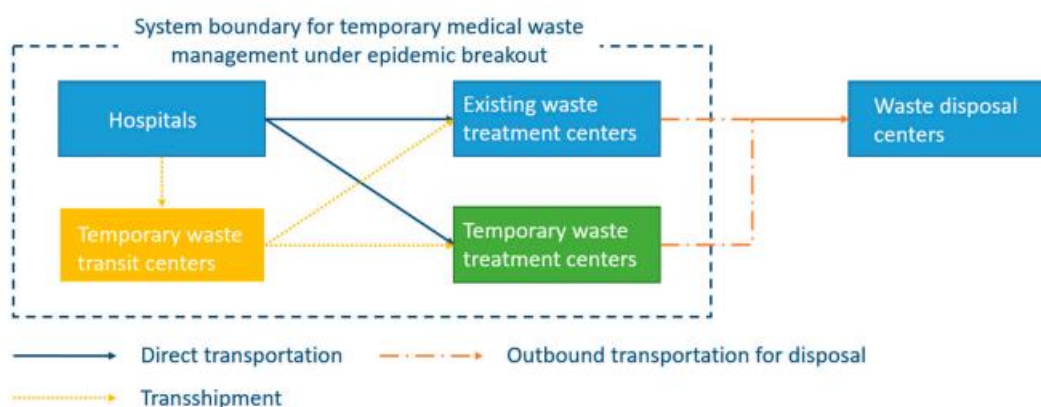
Η πανδημία COVID-19 που προκλήθηκε από την εμφάνιση ενός νέου κοροναϊού δημιούργησε αύξηση στη ζήτηση για ιατρικές υπηρεσίες και προστατευτικό εξοπλισμό, προκαλώντας την ταχεία αύξηση του ρυθμού παραγωγής μολυσματικών ιατρικών αποβλήτων. Η αποτελεσματική διαχείριση των ταχέως αυξανόμενων ιατρικών αποβλήτων μέσω της δημιουργίας ενός αξιόπιστου και αποδοτικού δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της εξάπλωσης της πανδημίας. Με την πάροδο των ετών, έχουν διατυπωθεί μοντέλα και μέθοδοι βελτιστοποίησης προκειμένου να διερευνηθούν τα προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα και να βελτιωθούν οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων για την προετοιμασία και την αντιμετώπιση επιδημικών εξάρσεων (Yu et al., 2020). Ωστόσο, οι έρευνες με επίκεντρο τον σχεδιασμό ενός δικτύου για την διαχείριση ιατρικών αποβλήτων κατά τη διάρκεια επιδημικών εξάρσεων είναι αρκετά περιορισμένες, καθώς οι περισσότερες επικεντρώνονται κυρίως στις αλυσίδες εφοδιασμού για την παροχή ιατρικών υπηρεσιών και διανομή ιατρικού εξοπλισμού, ενώ το ερευνητικό επίκεντρο των μοντέλων αντίστροφης εφοδιαστικής για ιατρικά απόβλητα είναι η πρόταση για τον σχεδιασμό του συστήματος με οικονομικά αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο (Yu et al., 2020). Η παραγωγή ιατρικών αποβλήτων αυξάνεται εκθετικά σε επιδημικές εξάρσεις και μπορεί, αν δεν συλληθθούν ή διαχειριστούν κατάλληλα, να επιταχύνει την εξάπλωση της νόσου και να αποτελέσει σημαντικό κίνδυνο τόσο για το ιατρικό προσωπικό όσο και για τους ασθενείς. Για το λόγο αυτό, ο σωστός σχεδιασμός ενός δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για την αποτελεσματική διαχείριση του αυξημένου όγκου ιατρικών αποβλήτων και των κινδύνων υγειονομικής περιθάλψης σε επιδημικές εξάρσεις είναι υψίστης σημασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται δίκτυα αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας που έχουν προταθεί, απεικονίζονται μέσω μαθηματικών μοντέλων και επαληθεύονται μέσα από μελέτες περίπτωσης με πραγματικά δεδομένα.

4.1 Χωροθέτηση εγκαταστάσεων και στρατηγικές μεταφοράς του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού

Οι Yu et al. (2020) προτείνουν ένα μοντέλο σχεδιασμού δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής για την αποτελεσματική διαχείριση των ιατρικών αποβλήτων σε επιδημικές εξάρσεις, προσδιορίζοντας και αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του δικτύου και διαμορφώνοντας ένα μοντέλο βελτιστοποίησης προκειμένου να βελτιωθούν οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων ως προς το χρόνο, την τοποθεσία των εγκαταστάσεων και τις στρατηγικές ως προς τον τρόπο λειτουργίας σε διαφορετικές περιόδους.

Περιγραφή του προβλήματος

Ως ιατρικά χαρακτηρίζονται τα απόβλητα που παράγονται λόγω δραστηριοτήτων υγειονομικής περίθαλψης από νοσοκομεία, κλινικές κ.λπ., τα οποία ενδέχεται να περιέχουν επικίνδυνες ουσίες με κίνδυνο μόλυνσης του ιατρικού προσωπικού, των ασθενών και του κοινού γενικότερα. Η αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα των ιατρικών αποβλήτων περιλαμβάνει τις εξής δραστηριότητες: 1) συλλογή και διαχωρισμός στις ιατρικές εγκαταστάσεις, η οποία συνήθως γίνεται σε κάδους με χρωματικούς κωδικούς βάσει των χαρακτηριστικών τους, 2) μεταφορά, η οποία περιλαμβάνει δύο μέρη· το πρώτο μέρος είναι η μεταφορά των μολυσματικών ιατρικών αποβλήτων από τα νοσοκομεία σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας και το δεύτερο μέρος είναι η μεταφορά των υπολειμμάτων σε χώρους υγειονομικής ταφής, 3) κατάλληλη επεξεργασία και διάθεση λόγω της επικίνδυνης φύσης του εξοπλισμού. Ο σχεδιασμός δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής για τη διαχείριση ιατρικών αποβλήτων έχει διατυπωθεί από πολλούς ερευνητές. Το πρόβλημα συνήθως μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων σε δύο στάδια, όπου οι αποφάσεις του πρώτου σταδίου επιλέγουν τις στρατηγικές θέσεις για διαφορετικές εγκαταστάσεις και οι αποφάσεις του δεύτερου σταδίου καθορίζουν τις λειτουργίες του δικτύου σε έναν βραχυπρόθεσμο ορίζοντα. Στόχος είναι να εξισορροπηθούν οι οικονομικές επιδόσεις και ο περιβαλλοντικός κίνδυνος που συνδέεται με τη συλλογή, τη μεταφορά, την επεξεργασία και τη διάθεση ιατρικών αποβλήτων (Yu et al., 2020). Ωστόσο, κατά τη διάρκεια μιας επιδημικής έξαρσης η δημιουργία μολυσματικών ιατρικών αποβλήτων μπορεί να αυξηθεί ραγδαία λόγω της ταχείας εξάπλωσης του ιού, καθιστώντας τον σχεδιασμό ενός δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας μια πρόκληση. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται το πλαίσιο ενός δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας όπου τα ιατρικά απόβλητα μπορούν να μεταφερθούν από τα νοσοκομεία σε προσωρινές εγκαταστάσεις επεξεργασίας και προσωρινά κέντρα διαλογής, εκτός από τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις, προκειμένου να διαχειρίζονται κατάλληλα πριν από την τελική διάθεση.



Εικόνα 5: Δίκτυο αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για την αποτελεσματική διαχείριση ιατρικών αποβλήτων σε περίπτωση επιδημίας (Yu et al., 2020)

Σε σύγκριση με τον παραδοσιακό σχεδιασμό δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής για τη διαχείριση ιατρικών αποβλήτων, το πρόβλημα στην επιδημική έξαρση έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Yu et al., 2020):

- Ο ορίζοντας σχεδιασμού είναι πολύ μικρότερος και κυμαίνεται συνήθως από αρκετές εβδομάδες έως αρκετούς μήνες.
- Ωστόσο, εντός του ορίζοντα σχεδιασμού, η αύξηση ή η αλλαγή της παραγωγής ιατρικών αποβλήτων είναι πολύ σημαντική ανάλογα με το μοτίβο της επιδημικής εξάπλωσης.
- Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η ταχεία αλλαγή της παραγωγής ιατρικών αποβλήτων, πρέπει να εγκατασταθούν προσωρινές εγκαταστάσεις με έγκαιρο και γρήγορο τρόπο.
- Σε σύγκριση με το κόστος, ο έλεγχος των επιπτώσεων του κινδύνου παίζει σημαντικότερο ρόλο προκειμένου να ελέγχεται αποτελεσματικά η ταχεία εξάπλωση λοιμωδών ασθενειών.

Βάσει των παραπάνω, προτείνεται ένα μοντέλο πολλαπλών χρονικών περιόδων μεικτού αέριου προγραμματισμού τριών αντικειμενικών συναρτήσεων για την υποστήριξη αποφάσεων του σχεδιασμού δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για την αποτελεσματική διαχείριση των ιατρικών αποβλήτων σε επιδημικές εξάρσεις. Ο στόχος του μοντέλου είναι, μέσω της βελτιστοποίησης των αποφάσεων σχετικά με τον χρόνο δημιουργίας και τις τοποθεσίες των προσωρινών εγκαταστάσεων, σε συνδυασμό με τις στρατηγικές μεταφοράς σε διαφορετικές περιόδους, να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά η τεράστια αύξηση των ιατρικών αποβλήτων εντός του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού και να μειωθεί αποτελεσματικά ο κίνδυνος επιδημικής εξάπλωσης από τη συλλογή, μεταφορά και επεξεργασία ιατρικών αποβλήτων και κινδύνων υγειονομικής περιθάλαξης. Επιπλέον, ο κίνδυνος από τα υπολείμματα ιατρικών αποβλήτων ελαχιστοποιείται στα κέντρα επεξεργασίας και μπορούν έτσι τα ιατρικά απόβλητα να αποθηκευθούν με ασφάλεια, να μεταφερθούν και να απορριφθούν σε μεταγενέστερα στάδια. Ο κίνδυνος που συνδέεται με τη μεταφορά, την αποθήκευση και την απόρριψη των καταλοίπων δεν λαμβάνεται υπόψη στο μαθηματικό μοντέλο (Yu et al., 2020).

Το μαθηματικό μοντέλο

Αρχικά δίνονται οι ορισμοί των συνόλων, των παραμέτρων και των μεταβλητών απόφασης και στη συνέχεια διατυπώνονται οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί του μαθηματικού μοντέλου.

Οι συναρτήσεις που διατυπώνονται αφορούν:

- την ελαχιστοποίηση του κινδύνου στις πηγές δημιουργίας ιατρικών αποβλήτων,
- την ελαχιστοποίηση του κινδύνου κατά την μεταφορά και την επεξεργασία ιατρικών αποβλήτων,
- την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους για τη δημιουργία και τη λειτουργία του προσωρινού συστήματος αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας

για ιατρικά απόβλητα σε επιδημικές εξάρσεις, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης των προσωρινών εγκαταστάσεων, το κόστος λειτουργίας τους και το κόστος μεταφοράς.

Προφανώς, οι τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις μπορεί έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους. Η ελαχιστοποίηση της μιας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση κάποιας από τις άλλες. Για παράδειγμα, η ελαχιστοποίηση του κινδύνου ατυχήματος σε νοσοκομεία και ιδρύματα υγειονομικής περίθαλψης απαιτεί την απομάκρυνση της μέγιστης ποσότητας ιατρικών αποβλήτων από τις πηγές και την κατάλληλη έγκαιρη επεξεργασία τους. Ωστόσο, από την άλλη πλευρά, αυτό αυξάνει τον κίνδυνο και το κόστος της μεταφοράς και επεξεργασίας ιατρικών αποβλήτων. Ως εκ τούτου, στόχος της βελτιστοποίησης είναι να εξισορροπηθούν οι τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις μέσω της λήψης αποφάσεων σχετικά με τις θέσεις των προσωρινών εγκαταστάσεων και τις στρατηγικές μεταφοράς κάθε περιόδου εντός του ορίζοντα σχεδιασμού.

Οι περιορισμοί που διατυπώνονται αφορούν:

- τη μη συλλεγόμενη ποσότητα ιατρικών αποβλήτων σε κάθε νοσοκομείο μέχρι το τέλος κάθε περιόδου,
- την αδυναμία αποθήκευσης των ιατρικών αποβλήτων στα προσωρινά κέντρα διαμετακόμισης, λόγω της χρήσης τους μόνο για την ενοποίηση των μεταφορών και του υψηλού κινδύνου μόλυνσης,
- τον καθορισμό της ποσότητας εισόδου των ιατρικών αποβλήτων στα υπάρχοντα και στα προσωρινά κέντρα επεξεργασίας
- τον περιορισμό σε χωρητικότητα των προσωρινών κέντρων διαμετακόμισης
- το χαμηλότερο ποσοστό χρήσης ενός προσωρινού κέντρου διέλευσης
- την ικανότητα και τη χρήση των υφιστάμενων και των προσωρινών κέντρων επεξεργασίας
- τις περιόδους επιλογής και λειτουργίας των εγκαταστάσεων
- τις απαιτήσεις για τις μεταβλητές απόφασης

Στο Παράρτημα 1 αναφέρονται αναλυτικά οι συναρτήσεις καθώς και η προσεγγιστική λύση από τους Yu et al. (2020).

Μελέτη περίπτωσης

Η εφαρμογή του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου γίνεται μέσα από μια μελέτη περίπτωσης με πραγματικά δεδομένα από την Κίνα κατά το αρχικό κύμα της πανδημίας COVID-19. Αρχικά, γίνεται μια πρόβλεψη της επιδημικής έξαρσης με ένα μοντέλο SEIR μέσω προσομοίωσης σύμφωνα με τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα κατά την περίοδο της μελέτης, σε συνδυασμό με κάποιες υποθέσεις. Το μοντέλο SEIR βασίζεται στη θεωρία των μοντέλων διαμέρισης (compartmental models), τεχνική μοντελοποίησης που εφαρμόζεται συχνά στη μαθηματική μοντελοποίηση μολυσματικών ασθενειών, αντιστοιχίζοντας τον πληθυσμό σε συγκεκριμένες ομάδες. Επίσης, έγινε μια καταγραφή των ήδη υπαρχόντων νοσοκομείων, των προσωρινών νοσοκομείων και των προσωρινών κινητών μονάδων υγείας καθώς και της δυναμικότητας για κάθε μια εγκατάσταση. Έπειτα, υπολογίζεται η ποσότητα

ιατρικών αποβλήτων που παράγεται ανά νοσοκομείο ανά περίοδο. Στη συνέχεια, γίνεται καταγραφή των προσωρινών εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων που ήδη είχαν τοποθετηθεί κοντά σε διάφορα κέντρα προσωρινής υγειονομικής περίθαλψης και των υποψήφιων τοποθεσιών για τη δημιουργία νέων εγκαταστάσεων επεξεργασίας και σταθμών μεταφοράς αποβλήτων. Έπειτα, διατυπώνονται υποθέσεις σχετικά με τις πιθανότητες κινδύνου μόλυνσης σε όλες τις εγκαταστάσεις, τα κόστη και την δυνατότητα διαχείρισης των ήδη υπαρχόντων και των προσωρινών εγκαταστάσεων βάσει των δεδομένων που συλλέχθηκαν και υπαρχουσών μελετών.

Αποτελέσματα

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης λύθηκαν μέσω του Lingo 18.0, ενός λογισμικού μοντελοποίησης βελτιστοποίησης για γραμμικό, μη γραμμικό και ακέραιο προγραμματισμό. Κατά τη βέλτιστη λύση, τα ιατρικά απόβλητα που συλλέγονται στα νοσοκομεία αποστέλλονται απευθείας στα κέντρα επεξεργασίας και δεν επιλέγεται η μεταφόρτωση μέσω ενδιάμεσων κέντρων διαμετακόμισης. Εκτός από την υφιστάμενη μονάδα αποτέφρωσης ιατρικών αποβλήτων, επιλέχθηκαν άλλες πέντε υποψήφιες εγκαταστάσεις για την δημιουργία προσωρινών κέντρων αποτέφρωσης, οι οποίες θα λειτουργούσαν σε διαφορετικές περιόδους. Δύο από τα ήδη υφιστάμενα νοσοκομεία επιλέχθηκαν για να ανοίξουν προσωρινά κέντρα επεξεργασίας ιατρικών αποβλήτων.

Συμπεράσματα

Παρά το γεγονός ότι η μελέτη περίπτωσης διεξήχθη με βάση διάφορες παραδοχές και το υπολογιστικό αποτέλεσμα θα μπορούσε να επηρεαστεί από τη συμβολή των υπευθύνων λήψης αποφάσεων, μπορούν να δοθούν τέσσερις συστάσεις λαμβάνοντας υπόψη τη γενικότητα του προβλήματος (Yu et al., 2020):

- Η δημιουργία ενός αποτελεσματικού δικτύου αντιστροφής εφοδιαστικής αλυσίδας με προσωρινές εγκαταστάσεις είναι σημαντική για την αντιμετώπιση της ταχείας αύξησης του όγκου των ιατρικών αποβλήτων σε περίπτωση επιδημικής έξαρσης.
- Η επιλογή των θέσεων εγκατάστασης είναι μία από τις σημαντικότερες αποφάσεις τόσο για τον έλεγχο των κινδύνων όσο και για τη διαχείριση του κόστους του προσωρινού συστήματος αντίστροφης εφοδιαστικής.
- Λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο που απαιτείται για την κατασκευή, την εγκατάσταση και την προσαρμογή των προσωρινών εγκαταστάσεων, ο προηγμένος σχεδιασμός του χρόνου που θα λειτουργήσει μια εγκατάσταση είναι ζωτικής σημασίας.
- Η αύξηση των δημοσιονομικών περιορισμών μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματικότερο έλεγχο των κινδύνων, αλλά το κόστος μπορεί να ποικίλει.

4.2 Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, του κινδύνου μόλυνσης και της μέγιστης ποσότητας του μη συλλεγόμενου μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού

Οι Kargar et al. (2020) παρουσιάζουν ένα μοντέλο το οποίο μειώνει το κόστος και τους κινδύνους που συνδέονται με τη συλλογή και την επεξεργασία του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού, καθώς και τον κίνδυνο μόλυνσης που μπορεί να προκληθεί από μη συλλεγόμενη ποσότητα του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού σε κάθε κέντρο παραγωγής ιατρικών αποβλήτων, οδηγώντας στη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου τριών αντικειμενικών συναρτήσεων.

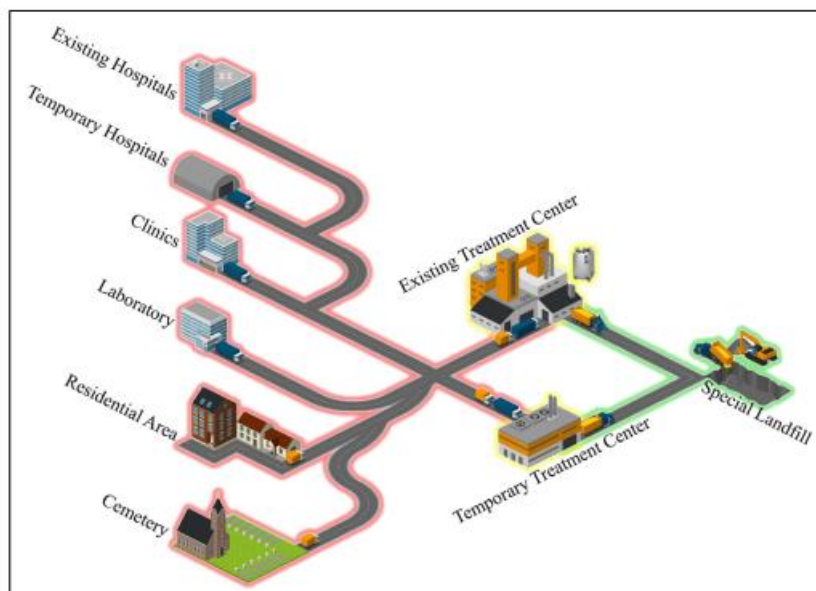
Περιγραφή του προβλήματος

Για τον σχεδιασμό ενός μοντέλου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας το οποίο να είναι συμβατό με τις πραγματικές συνθήκες της τρέχουσας πανδημίας και της πιθανής έξαρσης της σε μια συγκεκριμένη περιοχή, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη κάποιες παραδοχές:

- Τα υπάρχοντα νοσοκομεία διαθέτουν μέρος των κλινών τους για τους ασθενείς που νοσούν από COVID-19
- Συστήνεται η προσωρινή επέταξη νοσοκομείων για την πιθανή ζήτηση επιπλέον κλινών
- Κάποια ιατρικά κέντρα αναλαμβάνουν την εξέταση ασθενών με συμπτώματα της νόσου. Συνεπώς, παράγουν μολυσμένο ιατρικό εξοπλισμό
- Τα εργαστήρια που διαθέτουν τον εξοπλισμό για να διαγνώσουν έναν ασθενή με COVID-19, παράγουν επίσης μολυσμένο ιατρικό εξοπλισμό.
- Οι ασθενείς που έχουν διαγνωσθεί με την νόσο COVID-19 και δεν νοσούν σοβαρά, βρίσκονται σε κατ' οίκον περιορισμό. Δεδομένου ότι οι συγκεκριμένοι ασθενείς παράγουν μολυσμένα ιατρικά απόβλητα, προτείνεται ο διαχωρισμός αυτών από τα γενικά απόβλητα έτσι ώστε η συλλογή και επεξεργασία τους να είναι ευκολότερη.
- Οι ασθενείς που απεβίωσαν λόγω της νόσου COVID-19, είναι θαμμένοι σε νεκροταφεία και δεδομένου ότι τα σώματα τους εξακολουθούν να φέρουν τον ιό, παράγονται μολυσμένα ιατρικά απόβλητα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το προτεινόμενο δίκτυο αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελείται από τρία τμήματα: την παραγωγή, την επεξεργασία και την ταφή των μολυσμένων ιατρικών αποβλήτων. Η παραγωγή του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού γίνεται από νοσοκομεία, εργαστήρια, ιατρικές κλινικές, κατοικημένες περιοχές και νεκροταφεία. Όλα τα συλλεγόμενα απόβλητα από διαφορετικά κέντρα μεταφέρονται στο δεύτερο τμήμα του δικτύου, το οποίο είναι κέντρα επεξεργασίας ώστε να μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία σύμφωνα με συγκεκριμένα πρωτόκολλα. Μετά τη διαδικασία της επεξεργασίας, η οποία γίνεται σε ήδη υφιστάμενα κέντρα ή νέα προσωρινής επεξεργασίας, εξαλείφονται τα ίχνη του ιού. Τέλος, τα επεξεργασμένα απόβλητα αποστέλλονται σε ειδικούς χώρους υγειονομικής

ταφής για να ταφούν σύμφωνα με τα πρωτόκολλα υγιεινής. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η δομή του προτεινόμενου δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.



Εικόνα 6: Δομή προτεινόμενου δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας (Kargar et al., 2020)

Το μαθηματικό μοντέλο

Αναπτύσσεται ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού με τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, του κινδύνου που συνδέεται με τη μεταφορά και την επεξεργασία του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού και της μέγιστης ποσότητας των μη συλλεγόμενων ιατρικών αποβλήτων στα κέντρα παραγωγής τους.

Οι κύριες αποφάσεις που καθορίζονται από το προτεινόμενο μοντέλο είναι (Kargar et al., 2020):

1. Η εύρεση της καλύτερης τοποθεσίας για την εγκατάσταση προσωρινών κέντρων επεξεργασίας αποβλήτων
2. Ο προσδιορισμός του αριθμού των κέντρων προσωρινής επεξεργασίας
3. Ο καθορισμός της βέλτιστης ροής μεταξύ των κέντρων
4. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης ποσότητας μη συλλεγόμενων αποβλήτων στα κέντρα παραγωγής τους

Αρχικά δίνονται οι ορισμοί των συνόλων, των παραμέτρων και των μεταβλητών απόφασης και στη συνέχεια διατυπώνονται οι αντικειμενικές συναρτήσεις του μαθηματικού μοντέλου.

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που διατυπώνονται αφορούν:

- την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, όπου συμπεριλαμβάνεται το πάγιο κόστος λειτουργίας των υφιστάμενων κέντρων επεξεργασίας και το κόστος λειτουργίας τους για την επεξεργασία των αποβλήτων, την εγκατάσταση και το σταθερό κόστος λειτουργίας των προσωρινών κέντρων επεξεργασίας, το μεταβλητό κόστος λειτουργίας των προσωρινών κέντρων επεξεργασίας για την επεξεργασία των αποβλήτων, το κόστος μεταφοράς από τα ήδη υφιστάμενα κέντρα στα προσωρινά, το κόστος μεταφοράς των επεξεργασμένων αποβλήτων από τα κέντρα επεξεργασίας στους ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής και το κόστος συλλογής αποβλήτων από τις κατοικημένες περιοχές.
- την ελαχιστοποίηση του κινδύνου κατά τη μεταφορά των αποβλήτων από τα κέντρα παραγωγής τους στα μόνιμα και τα προσωρινά κέντρα επεξεργασίας και την επεξεργασία των μολυσματικών αποβλήτων στα μόνιμα και στα προσωρινά κέντρα επεξεργασίας
- την ελαχιστοποίηση της μέγιστης ποσότητας μη συλλεγόμενων αποβλήτων στα κέντρα παραγωγής τους σε όλες τις περιόδους

Οι περιορισμοί που διατυπώνονται αφορούν:

- την εξισορρόπηση της ροής μεταξύ των κέντρων παραγωγής ιατρικών αποβλήτων, των υπαρχόντων κέντρων επεξεργασίας και των προσωρινών κέντρων επεξεργασίας
- την εγγύηση ότι η εισροή αποβλήτων στα υπάρχοντα και στα προσωρινά κέντρα επεξεργασίας είναι μικρότερη ή ίση με τη δυναμικότητα τους
- την ισότητα της ροής και της εκροής από και προς τα υπάρχοντα και στα προσωρινά κέντρα επεξεργασίας
- την εγγύηση ότι η εκροή επεξεργασμένων ιατρικών αποβλήτων από και προς τα υπάρχοντα και τα προσωρινά κέντρα επεξεργασίας είναι ίση με την εισροή τους στους ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής
- τα χαρακτηριστικά των μεταβλητών απόφασης

Σημαντικό ρόλο παίζει η γνώση του αριθμού των ασθενών που έχουν μολυνθεί από τη νόσο, καθώς έτσι υπάρχει μια πιο ρεαλιστική πρόβλεψη της παραγόμενης ποσότητας μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού. Έτσι, δημιουργούνται συναρτήσεις που αφορούν την ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων σε νοσοκομεία, εργαστήρια, κλινικές, κατοικίες και νεκροταφεία, τον αριθμό των ασθενών που βρίσκονται υπό ιατρική φροντίδα σε νοσοκομείο και τον αριθμό των ατόμων που βρίσκονται σε κατ' οίκον περιορισμό.

Στο Παράρτημα 2 αναφέρονται αναλυτικά οι συναρτήσεις καθώς και η διαδικασία που ακολουθείται για την προσεγγιστική λύση από τους Kargar et al., 2020.

Μελέτη Περίπτωσης

Η εφαρμογή του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου γίνεται μέσα από μια μελέτη περίπτωσης με πραγματικά δεδομένα από την πόλη Babol που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του Ιράν. Σύμφωνα με τη μελέτη, ως κέντρα παραγωγής μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού ορίζονται τα ήδη υπάρχοντα νοσοκομεία, τα προσωρινά νοσοκομεία, τα εργαστήρια, οι ιατρικές κλινικές και τα νεκροταφεία. Όσον αφορά τις κατοικημένες περιοχές, κάθε εξεταζόμενη περιοχή διαιρέθηκε σε διαφορετικά μέρη και καθένα από αυτά θεωρείται ως ξεχωριστό κέντρο. Επίσης, κατά τη μελέτη, εξετάζονται τρία ήδη υπάρχοντα κέντρα επεξεργασίας, δύο εκ των οποίων βρίσκονται εντός των υπάρχοντων νοσοκομείων, ενώ υπάρχουν και τρία διαθέσιμα προσωρινά κέντρα επεξεργασίας, δύο εκ των οποίων μπορούν να εγκατασταθούν σε ήδη υπάρχοντα νοσοκομεία. Όλα τα κέντρα επεξεργασίας διαθέτουν κλιβάνους. Ο ορίζοντας σχεδιασμού του μοντέλου είναι 48 ώρες, αποτελούμενος από έξι περιόδους 8 ωρών. Αρχικά, γίνεται μια πρόβλεψη του ποσοστού παραγωγής μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού από κάθε κέντρο βάσει του πληθυσμού. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η πιθανότητα κινδύνου σε κάθε κέντρο θεραπείας, η πιθανότητα κινδύνου που σχετίζεται με τη μεταφορά του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού και η πιθανότητα του κινδύνου έκθεσης του πληθυσμού κατά μήκος της διαδρομής του φορτηγού. Τέλος, υπολογίζονται το κόστος περισυλλογής του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού από τις κατοικημένες περιοχές, το κόστος επεξεργασίας και καύσης των αποβλήτων, το κόστος μεταφοράς του μολυσμένου εξοπλισμού και των επεξεργασμένων αποβλήτων, το κόστος εγκατάστασης των προσωρινών κέντρων επεξεργασίας και το σταθερό κόστος λειτουργίας κάθε κλιβάνου.

Αποτελέσματα

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε επιλύθηκε με το Lingo 17.0, λογισμικό μοντελοποίησης βελτιστοποίησης για γραμμικό, μη γραμμικό και ακέραιο προγραμματισμό. Αρχικά κάθε αντικειμενική συνάρτηση εξετάζεται ξεχωριστά και το μοντέλο επιλύεται για να ληφθεί η καλύτερη και η χειρότερη περίπτωση σε κάθε στόχο. Στη συνέχεια το μοντέλο των τριών αντικειμενικών συναρτήσεων επιλύεται με το αναθεωρημένο μοντέλο προγραμματισμού πολλαπλών στόχων (Revised MultiChoice Goal Programming). Τα στοιχεία δείχνουν ότι μόνο ένα προσωρινό κέντρο θεραπείας χρησιμοποίησε την πλήρη δυναμικότητα του για την επεξεργασία μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού. Κατά τη βέλτιστη λύση το μοντέλο αποφασίζει μεταξύ πέντε κέντρων επεξεργασίας και μόνο οι δύο πρώτες περίοδοι έχουν μη συλλεγόμενα απόβλητα, πράγμα που δείχνει την αποτελεσματικότητα του μοντέλου, η οποία προέρχεται από τη μείωση του ποσοστού των παραγόμενων αποβλήτων σε κάθε κέντρο παραγωγής.

Ανάλυση ευαισθησίας

Οι αναλύσεις ευαισθησίας γίνονται σε ορισμένους παράγοντες λήψης αποφάσεων και παραμέτρους του μοντέλου για την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων σε πιθανές αλλαγές στο προτεινόμενο δίκτυο και είναι οι εξής:

- ανάλυση ευαισθησίας σε δεδομένα βάρη στις αντικειμενικές συναρτήσεις: μια μικρή αλλαγή στο δεδομένο βάρος δεν θα αλλάξει τις τελικές τιμές τους. Αν όμως δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα σε μια από τις δύο ή τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις θα αλλάξουν τα τελικά αποτελέσματα υπέρ τους. Δίνοντας μεγαλύτερο βάρος στην τρίτη συνάρτηση, το μοντέλο προτείνει την εγκατάσταση όλων των δυνητικών προσωρινών κέντρων επεξεργασίας.
- ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων της νόσου: δεδομένου ότι η σημαντικότερη αντικειμενική συνάρτηση είναι η ποσότητα των μη συλλεγόμενων παραγόμενων αποβλήτων, οι παράμετροι της νόσου έχουν άμεση επίδραση στα τελικά αποτελέσματα του προβλήματος. Με την αύξηση του ποσοστού μόλυνσης, αυξάνεται η ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων άρα αυξάνεται και το ποσοστό των μη συλλεγόμενων αποβλήτων. Το ποσοστό των παραγόμενων αποβλήτων μειώνεται όταν αυξάνεται το ποσοστό ανάρρωσης ασθενών. Και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζονται διαταραχές στο μοντέλο κατά την εγκατάσταση προσωρινών κέντρων επεξεργασίας.
- ανάλυση ευαισθησίας της ποσότητας παραγόμενων αποβλήτων: οι αλλαγές στην ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων ανά άτομο και ανά περίοδο μπορεί να έχουν θετική επίδραση σε όλες σχεδόν τις αντικειμενικές συναρτήσεις.

Συμπεράσματα

Τα τελικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο δημιούργησε μια ισορροπία μεταξύ των τριών εξεταζόμενων συναρτήσεων, καθορίζοντας τη ροή μεταξύ των κέντρων, εγκαθιστώντας δύο προσωρινά κέντρα επεξεργασίας, και επιτρέποντας στο δίκτυο να έχει μη συλλεγμένα απόβλητα κατά τις δύο πρώτες περιόδους ορισμένων κέντρων παραγωγής. Έδειξε ότι το πιο σημαντικό μέρος του κόστους είναι το κόστος της εγκατάστασης προσωρινού κέντρου επεξεργασίας (περίπου 50% του συνολικού κόστους). Τα επόμενα σημαντικά τμήματα είναι το κόστος μεταφοράς του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού και των επεξεργασμένων αποβλήτων με περίπου 16% και 10%, αντίστοιχα. Οι αναλύσεις ευαισθησίας έδειξαν ότι όταν οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων έδωσαν βάρος 0,5 στο δεύτερο και τρίτο στόχο, το μοντέλο μείωσε το κόστος περίπου 1,5% και τον κίνδυνο περίπου 3% στην πρώτη περίπτωση, ενώ μείωσε την ποσότητα των μη συλλεγόμενων αποβλήτων στο μηδέν στη δεύτερη περίπτωση, αντίστοιχα. Αυτή είναι μια ρεαλιστική υπόθεση, διότι αν η νόσος και τα απόβλητά της, τα οποία σε περίπτωση ακατάλληλης διαχείρισης μπορούν να επιταχύνουν την εξάπλωση της νόσου, τυγχάνουν κατάλληλης διαχείρισης, άλλα πιθανά μελλοντικά κόστη και προβλήματα που σχετίζονται με την υγεία και οι πιθανοί θάνατοι θα μειώνονται ή θα εξαλείφονται. Οι αναλύσεις ευαισθησίας έδειξαν ότι η συνεργασία της κοινωνίας σε μέτρα προφύλαξης, η εύρεση φαρμάκου ή θεραπείας και η μείωση της ποσότητας των παραγόμενων αποβλήτων ανά άτομο και ανά περίοδο θα μπορούσαν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου (Kargar et al., 2020).

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Η πανδημία COVID-19 απέδειξε ότι αρκετοί τομείς, όπως η δημόσια υγεία, η οικονομία, η επαγγελματική απασχόληση, η κοινότητα ακόμη και η ψυχική υγεία, είναι στενά συνυφασμένοι μεταξύ τους. Με την έξαρση του ιού και αφήνοντας πίσω εκατομμύρια θανάτους, όχι μόνο ασκήθηκε πίεση στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης σε ολόκληρο τον κόσμο, αλλά επηρεάστηκαν επίσης πολλές πτυχές της σύγχρονης ζωής. Η συρρίκνωση της παγκόσμιας οικονομίας, η διατάραξη της κοινοτικής αρμονίας, ο αρνητικός αντίκτυπος στην ψυχολογική ευημερία των ανθρώπων και η ανεπαρκής πληροφόρηση για την εξελισσόμενη κατάσταση της πανδημίας, είναι μερικές από αυτές. Η χρόνια ανεπαρκής χρηματοδότηση, οι ελλείψεις εξειδικευμένου δυναμικού και οι πεπαλαιωμένες υποδομές είχαν ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της ικανότητας του τομέα της υγείας να αντιμετωπίσει τις ανάγκες για την υγεία του πληθυσμού και της ευελιξίας του να ανταποκριθεί επαρκώς σε αυτή την κρίσιμη κατάσταση, καταδεικνύοντας την ανάγκη διαρθρωτικών μεταρρυθμίσεων για την αποκατάσταση του θεμελιώδους ρόλου του δημόσιου τομέα υγείας.

Κατά την έξαρση της πανδημίας αποκαλύφθηκε επίσης η ευθραυστότητα και η χαμηλή ανθεκτικότητα των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού. Δημιουργήθηκε ένα πρόβλημα το οποίο επηρέασε ταυτόχρονα την προσφορά και τη ζήτηση, καθιστώντας δύσκολη την ανταπόκριση τους. Σοβαρές ελλείψεις αφορούσαν κυρίως τις βιομηχανίες φαρμάκων και ιατροφαρμακευτικών προμηθειών, όπως η έλλειψη εξοπλισμού ατομικής προστασίας. Παρόλα αυτά, αρκετές επιχειρήσεις κατάφεραν να προσαρμοστούν στο πανδημικό περιβάλλον και να βελτιώσουν την ευελιξία τους, δείχνοντας έτσι ότι πρέπει γενικά να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα των λειτουργιών των παγκόσμιων εφοδιαστικών αλυσίδων. Ωστόσο, το ενδιαφέρον των ερευνητών επικεντρώθηκε κυρίως στη διαχείριση των εφοδιαστικών αλυσίδων έκτακτης ανάγκης καθώς παίζει έναν σημαντικό ρόλο στην πρόληψη και τον έλεγχο επιδημιών.

Προκειμένου να καταστεί δυνατός ο έλεγχος και ο περιορισμός της εξάπλωσης της πανδημίας, οι χώρες υιοθέτησαν πρακτικές και κανόνες υγιεινής, βάσει των οδηγιών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας αλλά και των Διεθνών Κανονισμών Υγείας (International Health Regulations, 2005). Ωστόσο, διαπιστώθηκαν αρκετά προβλήματα στην εφαρμογή των πρακτικών και αποδείχθηκε ότι αρκετές χώρες δεν ήταν έτοιμες να αντιμετωπίσουν αυτή την κρίση. Με την σύσταση των ειδικών υγείας για την χρήση εξοπλισμού ατομικής προστασίας δημιουργήθηκε ένα νέο πρόβλημα, καθώς με τη συνεχή χρήση αυτού του εξοπλισμού αυξήθηκε η παραγωγή ιατρικών αποβλήτων και η μη σωστή και ασφαλής διαχείριση του μπορεί να προκαλέσει νέες εστίες μόλυνσεων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάστηκαν πρακτικές και επικαιροποιημένες κατευθυντήριες γραμμές για τη διαχείριση του εξοπλισμού ατομικής προστασίας που ακολούθησαν κάποιες χώρες, καθώς και εναλλακτικές στρατηγικές για βιώσιμη διαχείριση του εξοπλισμού αυτού. Οι λόγοι για τους οποίους δεν υπήρξε σωστή διαχείριση του μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού είναι η έλλειψη

ενημέρωσης σχετικά με τους κινδύνους για την υγεία που σχετίζονται με τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης, η ανεπαρκής κατάρτιση στη σωστή διαχείριση των αποβλήτων, η απουσία συστημάτων διαχείρισης και διάθεσης αποβλήτων, οι ανεπαρκείς οικονομικοί και ανθρώπινοι πόροι και η χαμηλή προτεραιότητα που δίνεται στο θέμα. Η διαχείριση των αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης απαιτεί αυξημένη προσοχή και επιμέλεια για την αποφυγή δυσμενών συνεπειών για την υγεία. Παρακάτω προτείνονται δράσεις για τη βελτίωση της διαχείρισης τους (WHO, 2018):

- Προώθηση πρακτικών που μειώνουν τον όγκο των παραγόμενων αποβλήτων και εξασφαλίζουν τον προτεινόμενο διαχωρισμό των αποβλήτων.
- Ανάπτυξη στρατηγικών και συστημάτων μαζί με ισχυρή εποπτεία και ρύθμιση για την προοδευτική βελτίωση του διαχωρισμού, της καταστροφής και των πρακτικών διάθεσης των αποβλήτων με απώτερο στόχο την εκπλήρωση των εθνικών και διεθνών προτύπων.
- Όπου είναι εφικτό, να ευνοηθεί η ασφαλής και περιβαλλοντικά ορθή επεξεργασία των επικίνδυνων αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης (π.χ. με κλίβανο, επεξεργασία ατμού ενσωματωμένη με εσωτερική ανάμειξη και χημική επεξεργασία) έναντι της αποτέφρωσης ιατρικών αποβλήτων.
- Οικοδόμηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος, αντιμετώπιση των ευθυνών, κατανομή των πόρων, διαχείριση και διάθεση. Πρόκειται για μια μακροπρόθεσμη διαδικασία, η οποία στηρίζεται σε σταδιακές βελτιώσεις.
- Ευαισθητοποίηση όσον αφορά τους κινδύνους που σχετίζονται με τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης και τις ασφαλείς πρακτικές, και επιλογή ασφαλών και φιλικών προς το περιβάλλον επιλογών διαχείρισης, για την προστασία από τους κινδύνους κατά τη συλλογή, διαχείριση, αποθήκευση, μεταφορά, επεξεργασία ή διάθεση των αποβλήτων.

Εκτενέστερα των παραπάνω, ο σχεδιασμός ενός δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για την αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο και τον περιορισμό της εξάπλωσης μιας επιδημίας. Οι έρευνες με επίκεντρο τη δημιουργία ενός τέτοιου δικτύου είναι αρκετά περιορισμένες, καθώς οι περισσότερες έχουν ως επίκεντρο τη διαχείριση των αλυσίδων εφοδιασμού για την παροχή ιατρικού εξοπλισμού, ενώ το επίκεντρο των μοντέλων αντίστροφης εφοδιαστικής αφορά κυρίως την παροχή στρατηγικών αποφάσεων και προτάσεων. Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάστηκαν δύο μοντέλα δικτύων αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως προτάθηκαν από τους συγγραφείς και επαληθεύτηκαν μέσα από μελέτες περίπτωσης με πραγματικά δεδομένα. Όμως και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω έρευνας.

Οι πανδημίες ανασχηματίζουν την κοινωνία στο πέρασμα τους. Ο κόσμος θα είναι διαφορετικός μετά την πανδημία COVID-19 και θα πρέπει να αντληθούν νέα διδάγματα, διότι διαφορετικά ο κόσμος θα εξακολουθήσει να είναι ανεπαρκώς προετοιμασμένος για τις εξάρσεις του μέλλοντος.

Βιβλιογραφία

- Dasaklis T K., Pappis C P. and Rachaniotis N P. (2012) ‘Epidemics control and logistics operations: a review’, *International Journal of Production Economics*, Volume 139, Issue 2, pp 393-410. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527312002150> [Downloaded: 16 November 2020]
- Govindan K., Soleimani H. and Kannan D. (2015) ‘Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future’, *European Journal of Operational Research*, Volume 240, Issue 3, pp 603-626
- Jiang P., Wang Y., Liu C., Hu Y. and Xie J. (2020) *Evaluating Critical Factors Influencing the Reliability of Emergency Logistics Systems Using Multiple-Attribute Decision Making* Available at: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/7/1115> [Downloaded: 27 March 2021]
- Kargar S., Pourmehdi M. and Paydar M M. (2020) ‘Reverse logistics network design for medical waste management in the epidemic outbreak of the novel coronavirus (COVID-19)’, *Science of the Total Environment*, Volume 746, Article 141183.
- Klemes J J., Fan Y V., Tan R R. and Jiang P. (2020) ‘Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 127, Article 109883.
- Kulkarni Bhargavi N. and Anantharama V. (2020) ‘Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: challenges and opportunities’, *Science of the Total Environment*, Volume 743, Article 140693.
- Rowan N J., Laffey J G. (2021) ‘Unlocking the surge in demand for personal and protective equipment (PPE) and improvised face coverings arising from coronavirus disease (COVID-19) pandemic – Implications for efficacy, re-use and sustainable waste management’, *Science of the Total Environment*, Volume 752, Article 142259
- Senir Gül and Büyükkeklik Arzum (2020) ‘Reflections on the Pandemic in the Future of the World’, In Şeker Muzaffer, Özer Ali and Korkut Cem ed. *The Effects of COVID-19 Outbreak on Supply Chains and Logistics Activities*. Ankara: Turkish Academy of Sciences Publications.
- Sharma H B., Vanapalli K R., Cheela VR S., Ranjana V P., Jaglanc A K., Dubeya B., Goela S. and Bhattacharyab J. (2020) ‘Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic’, *Resources, Conservation & Recycling*, Volume 162, Article 105052. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920303694> [Downloaded: 2 March 2021]
- Silva A L P., Prata J C., Walker T R., Campos D., Duarte A C., Soares A M.V.M., Barcelò D. and Rocha-Santos T. (2020) ‘Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: policy solutions based on redesign and

reduction of single-use plastics and personal protective equipment’ , *Science of The Total Environment* , Volume 742, Article 140565.

Singh N., Tang Y. and. Ogunseitan O A. (2020) ‘Environmentally Sustainable Management of Used Personal Protective Equipment’ , *Environmental Science & Technology*, Volume 54, Issue 14, pp 8500–8502.

Singh N., Tang Y., Zhang Z. and Zheng C. (2020) ‘COVID-19 waste management: Effective and successful measures in Wuhan, China’ , *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 163, Article 105071

Uzma K., Roopa M., Mohammad AA. and Om J L. (2020) *Pandemics of the past: A narrative review*. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32515373/> [Downloaded: 7 January 2021]

Vanapalli K R., Sharma H B., Ranjan V P., Samal B., Bhattacharya J., Dubey B K. and Goel S. (2021) ‘Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic’ , *Science of the Total Environment*, Volume 750, Article 141514.

World Health Organization (2005) *Communicable Disease Control in Emergencies: a Field Manual*. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/96340> [Downloaded: 5 April 2021]

World Health Organization (2016) *International Health Regulations (2005)* Third Edition. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241580410> [Downloaded: 19 March 2021]

World Health Organization (2017) *Treatment and disposal technologies for health-care waste*. Available at: https://www.who.int/water_sanitation_health/medicalwaste/077to112.pdf [Downloaded: 2 March 2021]

World Health Organization (2018), WHO: Health-care waste. Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste> [Downloaded: 24 February 2021]

World Health Organization (2020) *The COVID-19 pandemic: lessons learned for the WHO European Region: a living document, 15 September 2020*. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/334385> [Downloaded: 12 May 2021]

Zhang X. and Sun C. (2020) ‘Construction of Emergency Logistics Coping with the COVID-19’ , *Academic Journal of Business & Management*, Vol. 2, Issue 7, pp 137-146. Available at: <https://francispress.com/papers/3024> [Downloaded: 24 February 2021]

Yu H., Sun X., Solvang W D. and Zhao X. (2020) ‘Reverse Logistics Network Design for Effective Management of Medical Waste in Epidemic Outbreaks: Insights from the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in Wuhan (China)’ , *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Volume 17(5): Article 1770. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7084373/> [Downloaded: 28 November 2020]

<https://www.worldometers.info/coronavirus/#countries> [Access date: 10 March 2022]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

First, the definitions of sets, parameters and decision variables are given. Then, the objective functions and constraints of the mathematical model are formulated.

Notations

Sets

H, h	Set and index of hospitals as well as other sources of medical waste
T, t	Set and index of the candidate locations for temporary transit centers
E, e	Set and index of existing treatment centers for medical waste
D, d	Set and index of the candidate locations for temporary treatment centers
P, p	Set and index of periods

Parameters

PbA_h	Probability of accidental risk at hospital $h \in H$
PbA_t	Probability of accidental risk at temporary transit center $t \in T$
PbA_e	Probability of accidental risk at existing treatment center $e \in E$
PbA_d	Probability of accidental risk at temporary treatment center $d \in D$
$Npat_h^p$	Number of patients received at hospital $h \in H$ in period $p \in P$
Pop_e	Population exposure around existing treatment center $e \in E$
Pop_d	Population exposure around temporary treatment center $d \in D$
Pop_{ht}	Population exposure along the route from hospital $h \in H$ to temporary transit center $t \in T$
Pop_{te}	Population exposure along the route from temporary transit center $t \in T$ to existing treatment center $e \in E$
Pop_{td}	Population exposure along the route from temporary transit center $t \in T$ to temporary treatment center $d \in D$
Pop_{he}	Population exposure along the route from hospital $h \in H$ to existing treatment center $e \in E$
Pop_{hd}	Population exposure along the route from hospital $h \in H$ to temporary treatment center $d \in D$
RI	Infection rate of the epidemic disease
Gw_h^p	Generation of medical waste at hospital $h \in H$ in period $p \in P$
Cap_t	Capacity of temporary transit center $t \in T$
Cap_e	Capacity of existing treatment center $e \in E$
Cap_d	Capacity of temporary treatment center $d \in D$
LB_t	Lower bound utilization requirement of temporary transit center $t \in T$
LB_e	Lower bound utilization requirement of existing treatment center $e \in E$
LB_d	Lower bound utilization requirement of temporary treatment center $d \in D$
InS_t	Installation cost of temporary transit center $t \in T$
InS_d	Installation cost of temporary treatment center $d \in D$
$Oc_{t,p}^p$	Fixed operating cost of temporary transit center $t \in T$ in period $p \in P$
$Oc_{e,p}^p$	Fixed operating cost of existing treatment center $e \in E$ in period $p \in P$
$Oc_{d,p}^p$	Fixed operating cost of temporary treatment center $d \in D$ in period $p \in P$

$pc_{t,p}^p$	Unit processing cost at temporary transit center $t \in T$ in period $p \in P$
$pc_{e,p}^p$	Unit treatment cost at existing treatment center $e \in E$ in period $p \in P$
$pc_{d,p}^p$	Unit treatment cost at temporary treatment center $d \in D$ in period $p \in P$
$tc_{ht}^{p,p}$	Unit transportation cost from hospital $h \in H$ to temporary transit center $t \in T$
$tc_{te}^{p,p}$	Unit transportation cost from temporary transit center $t \in T$ to existing treatment center $e \in E$
$tc_{td}^{p,p}$	Unit transportation cost from temporary transit center $t \in T$ to temporary treatment center $d \in D$
$tc_{he}^{p,p}$	Unit transportation cost from hospital $h \in H$ to existing treatment center $e \in E$
$tc_{hd}^{p,p}$	Unit transportation cost from hospital $h \in H$ to temporary treatment center $d \in D$

Decision variables

Y_t	Binary variable determines if a temporary transit center will be opened at candidate location $t \in T$
Y_d	Binary variable determines if a temporary treatment center will be opened at candidate location $d \in D$
OT_t^p	Binary variable determines if a temporary transit center $t \in T$ will be used in period $p \in P$
OT_e^p	Binary variable determines if an existing treatment center $e \in E$ will be used in period $p \in P$
OT_d^p	Binary variable determines if a temporary treatment center $d \in D$ will be used in period $p \in P$
UQ_h^p	Uncollected amount of medical waste at hospital $h \in H$ in period $p \in P$
Q_t^p	Amount of medical waste processed at temporary transit center $t \in T$ in period $p \in P$
Q_e^p	Amount of medical waste treated at existing treatment center $e \in E$ in period $p \in P$
Q_d^p	Amount of medical waste treated at temporary treatment center $d \in D$ in period $p \in P$
Q_{ht}^p	Amount of medical waste transported from hospital $h \in H$ to temporary transit center $t \in T$ in period $p \in P$
Q_{te}^p	Amount of medical waste transported from temporary transit center $t \in T$ to existing treatment center $e \in E$ in period $p \in P$
Q_{td}^p	Amount of medical waste transported from temporary transit center $t \in T$ to temporary treatment center $d \in D$ in period $p \in P$
Q_{he}^p	Amount of medical waste transported from hospital $h \in H$ to existing treatment center $e \in E$ in period $p \in P$
Q_{hd}^p	Amount of medical waste transported from hospital $h \in H$ to temporary treatment center $d \in D$ in period $p \in P$

Objective Functions

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} PbA_h U Q_h^p Npat_h^p RI$$

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f_2 = & \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} PbA_{ht} Q_{ht}^p Pop_{ht} + \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} PbA_{te} Q_{te}^p Pop_{te} \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} PbA_{td} Q_{td}^p Pop_{td} + \sum_{h \in H} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} PbA_{he} Q_{he}^p Pop_{he} \\ & + \sum_{h \in H} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} PbA_{hd} Q_{hd}^p Pop_{hd} + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} PbA_t Q_t^p Pop_t \\ & + \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} PbA_e Q_e^p Pop_e + \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} PbA_d Q_d^p Pop_d \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f_3 = & \sum_{t \in T} Y_t InS_t + \sum_{d \in D} Y_d InS_d + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} (Oc_t^p OT_t^p + pc_t^p Q_t^p) \\ & + \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} (Oc_e^p OT_e^p + pc_e^p Q_e^p) + \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} (Oc_d^p OT_d^p + pc_d^p Q_d^p) \\ & + \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} tc_{ht}^p Q_{ht}^p + \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} tc_{te}^p Q_{te}^p + \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} tc_{td}^p Q_{td}^p \\ & + \sum_{h \in H} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} tc_{he}^p Q_{he}^p + \sum_{h \in H} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} tc_{hd}^p Q_{hd}^p \end{aligned}$$

Model constraints

The model is restricted by Equations (5)–(35).

Flow balance constraints: Equations (5) and (6) calculate the uncollected amount of medical waste at each hospital by the end of each period. Herein, Gw_h^p is a time-varying state parameter that is affected by the developing tendency of an epidemic. Several models and methods have been developed to study and to predict the dynamics of an infectious disease, among which the Susceptible-Exposed-Infected-Recovered (SEIR) model is the most widely adopted one [14,16,18,20]. Equations (7) and (8) are the flow balance constraints at the temporary transit centers. In epidemic reverse logistics system, the transit centers are considered as cross-docking centers only for the consolidation of transportation and, due to the high risk, medical waste cannot be stored at the temporary transit centers. Equations (9) and (10) determine the input amount of medical waste at both existing and temporary treatment centers. It is noteworthy that the formulated network structure allows both direct transportation and transshipment of medical waste. However, considering practical situations, a specific transportation mode may be determined by setting the respective parts in the model to 0:

$$UQ_h^1 = Gw_h^1 - \sum_{t \in T} Q_{ht}^1 - \sum_{e \in E} Q_{he}^1 - \sum_{d \in D} Q_{hd}^1, \forall h \in H \quad (5)$$

$$UQ_h^p = Gw_h^p + UQ_h^{p-1} - \sum_{t \in T} Q_{ht}^p - \sum_{e \in E} Q_{he}^p - \sum_{d \in D} Q_{hd}^p, \forall h \in H, p \in P \cap p \neq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{h \in H} Q_{ht}^p = Q_t^p, \forall t \in T, p \in P \quad (7)$$

$$Q_t^p = \sum_{e \in E} Q_{te}^p + \sum_{d \in D} Q_{td}^p, \forall t \in T, p \in P \quad (8)$$

$$Q_e^p = \sum_{t \in T} Q_{te}^p + \sum_{h \in H} Q_{he}^p, \forall e \in E, p \in P \quad (9)$$

$$Q_d^p = \sum_{t \in T} Q_{td}^p + \sum_{h \in H} Q_{hd}^p, \forall d \in D, p \in P \quad (10)$$

Capacity and utilization constraints: Equation (11) gives the capacity constraints of temporary transit centers, which also require the medical waste cannot be sent via a transit center if it is not in operation. In order to guarantee the effective use of a temporary transit center, Equation (12) sets up a lower bound for the rate of facility utilization if it is selected to operate in a given period. Equations (13)–(16) are the capacity and utilization constraints of both existing and temporary treatment centers:

$$Q_t^p \leq \text{Cap}_t \text{OT}_t^p, \forall t \in T, p \in P \quad (11)$$

$$Q_t^p \geq \text{LB}_t \text{Cap}_t \text{OT}_t^p, \forall t \in T, p \in P \quad (12)$$

$$Q_e^p \leq \text{Cap}_e \text{OT}_e^p, \forall e \in E, p \in P \quad (13)$$

$$Q_e^p \geq \text{LB}_e \text{Cap}_e \text{OT}_e^p, \forall e \in E, p \in P \quad (14)$$

$$Q_d^p \leq \text{Cap}_d \text{OT}_d^p, \forall d \in D, p \in P \quad (15)$$

$$Q_d^p \geq \text{LB}_d \text{Cap}_d \text{OT}_d^p, \forall d \in D, p \in P \quad (16)$$

$$\text{OT}_d^p \leq Y_d, \forall d \in D, p \in P \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P} \text{OT}_t^p \geq Y_t, \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{p \in P} \text{OT}_d^p \geq Y_d, \forall d \in D \quad (20)$$

Requirements of decision variables: Equations (21)–(34) give the domains of the decision variables, where the variables related to facility location and utilization are integers and the others related to allocation and transportation are continuous variables:

$$Y_t \in \{0, 1\}, \forall t \in T \quad (21)$$

$$Y_d \in \{0, 1\}, \forall d \in D \quad (22)$$

$$\text{OT}_t^p \in \{0, 1\}, \forall t \in T, p \in P \quad (23)$$

$$\text{OT}_e^p \in \{0, 1\}, \forall e \in E, p \in P \quad (24)$$

$$\text{OT}_d^p \in \{0, 1\}, \forall d \in D, p \in P \quad (25)$$

$$UQ_h^p \geq 0, \forall h \in H, p \in P \quad (26)$$

$$Q_t^p \geq 0, \forall t \in T, p \in P \quad (27)$$

$$Q_e^p \geq 0, \forall e \in E, p \in P \quad (28)$$

$$Q_d^p \geq 0, \forall d \in D, p \in P \quad (29)$$

$$Q_{ht}^p \geq 0, \forall h \in H, t \in T, p \in P \quad (30)$$

$$Q_{te}^p \geq 0, \forall t \in T, e \in E, p \in P \quad (31)$$

$$Q_{td}^p \geq 0, \forall t \in T, d \in D, p \in P \quad (32)$$

$$Q_{he}^p \geq 0, \forall h \in H, e \in E, p \in P \quad (33)$$

$$Q_{hd}^p \geq 0, \forall h \in H, d \in D, p \in P \quad (34)$$

Facility selection and operation periods: Equations (17) and (18) ensure that, in any period, a temporary facility cannot be used when the respective candidate location is not selected. It is noteworthy that, in this mathematical model, the variables Y_t and Y_d determine if the respective temporary facilities are to be installed and the variables OT_t^p and OT_d^p decide when these temporary facilities are to be used. Equations (19) and (20) require that, if a candidate location is selected to install a respective temporary facility, it must be used for the transshipment or for the treatment of medical waste within the planning horizon:

$$\text{OT}_t^p \leq Y_t, \forall t \in T, p \in P \quad (17)$$

Solution Approach

The three objective functions in the proposed mathematical model evaluate both risk and cost related to collection, transportation, and treatment of medical waste in epidemic outbreak. However, due to the measurements of these three objective functions are by no means identical, they cannot be combined directly with a weighted sum. Thus, in order to solve the multi-objective optimization problem, an interactive fuzzy approach proposed by Pishvae and Razmi [66] is used in this paper.

The procedures of the interactive fuzzy approach are given as follows:

- (1) First, the priority level of the three objective functions f_1 , f_2 and f_3 are determined by the decision-makers.
- (2) The best solution $f^{optimal}$ and the worst solution f^{nadir} of the three objective functions are calculated. The $f^{optimal}$ is obtained by optimizing each objective function individually. The f^{nadir} is calculated with a lexicographic method based on the given priority level of the objective functions in order to obtain non-dominated efficient solutions [67]. The range of each objective function can then be determined.
- (3) The satisfaction level of each objective function can be calculated by the fuzzy membership functions given in Equations (35)–(37), which ranges from 0 to 1.

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } f_1 < f_1^{optimal} \\ \frac{f_1^{nadir} - f_1}{f_1^{nadir} - f_1^{optimal}}, & \text{if } f_1^{optimal} \leq f_1 \leq f_1^{nadir} \\ 0, & \text{if } f_1 > f_1^{nadir} \end{cases} \quad (35)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } f_2 < f_2^{optimal} \\ \frac{f_2^{nadir} - f_2}{f_2^{nadir} - f_2^{optimal}}, & \text{if } f_2^{optimal} \leq f_2 \leq f_2^{nadir} \\ 0, & \text{if } f_2 > f_2^{nadir} \end{cases} \quad (36)$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } f_3 < f_3^{optimal} \\ \frac{f_3^{nadir} - f_3}{f_3^{nadir} - f_3^{optimal}}, & \text{if } f_3^{optimal} \leq f_3 \leq f_3^{nadir} \\ 0, & \text{if } f_3 > f_3^{nadir} \end{cases} \quad (37)$$

- (4) With the given priority level of different objective functions, the multi-objective optimization problem can then be converted to a single objective model with the ε -constraint method given in Equation (38), where ε_{f_2} and ε_{f_3} are the required satisfaction levels:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \mu_1(x) \\ & \text{Subject to:} \\ & \mu_2(x) \geq \varepsilon_{f_2} \\ & \mu_3(x) \geq \varepsilon_{f_3} \\ & \varepsilon_{f_2}, \varepsilon_{f_3} \in [0, 1] \\ & \text{Equations (5)–(34)} \end{aligned} \quad (38)$$

- (5) The satisfaction levels ε_{f_2} and ε_{f_3} can be adjusted in order to generate a set of Pareto optimal solutions, from which a preferred combination can be selected by the decision-makers.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

The proposed mathematical model

The main decisions determined by the presented mode follows:

1. Finding the best location for installing temporary waste treatment centers.
2. Specifying the number of temporary treatment centers.
3. Determining the optimal flow between centers.
4. Determining the optimal amount of uncollected waste in M Indices:

i	Medical waste generation center (MWGC)
c	Existing treatment center (ETC)
j	Potential locations for temporary treatment center (TTC)
d	Special landfill (SL)
t	Period

Parameters:

CT_c	Unit treatment cost in ETC c
CT_j	Unit treatment cost in TTC j
DC_d	Unit burial cost in SL d
R	Unit transportation cost for IMW
RT	Unit transportation cost for treated MW
CO_i	Unit collection cost for collecting IMW from RA i and transferring related transfer station
PbA_{ic}	Probability of accidental risk for transportation between MWGC i and c
PbA_{ij}	Probability of accidental risk for transportation between MWGC i and j
$PbAA_c$	Probability of accidental risk at ETC c
$PbAA_j$	Probability of accidental risk at TTC j
WUW_i	Weight assigned to the severity of the harm of uncollected waste in MWGC i
$Popr_{ic}$	Population exposure along the route from MWGC i to ETC c
$Popr_{ij}$	Population exposure along the route from MWGC i to TTC j
Pop_c	Population exposure around ETC c
Pop_j	Population exposure around TTC j
INS_j	Installation cost of TTC in location j
$FICT_j$	Fixed operating cost of TTC j
FIC_c	Fixed operating cost of ETC c
DIC_{ic}	Distance from MWGC i to ETC c
DIT_{ij}	Distance from MWGC i to TTC j
DID_{cd}	Distance from ETC c to SL d
$DIDT_{jd}$	Distance from TTC j to SL d
CAC_c	Maximum capacity of ETC c
$CACT_j$	Maximum capacity of TTC j
DE_{it}	Amount of generated waste in the MWGC i in period t

Decision variables:

W_j	1 If TTC is installed in location j , 0 otherwise
ZCT_{jt}	1 If TTC j is utilized in period t , 0 otherwise
ZC_{ct}	1 If ETC c is utilized in period t , 0 otherwise
Y_{ict}	Amount of waste transported from MWGC i to ETC c in period t
YT_{ijt}	Amount of waste transported from MWGC i to TTC j in period t
TQ_{ct}	Amount of waste treated at ETC c in period t
TQT_{jt}	Amount of waste treated at TTC j in period t
Q_{cdt}	Amount of waste transported from ETC c to SL d in period t
QT_{jdt}	Amount of waste transported from TTC j to SL d in period t
UQ_{it}	Amount of uncollected waste at MWGC i in period t

Objective functions:

$$\begin{aligned} MinZ_1 = & \left(\sum_j \sum_t FICT_j \times ZCT_{jt} \right) + \left(\sum_c \sum_t CT_c \times TQ_{ct} \right) + \left(\sum_j INS_j \times W_j \right) \\ & + \left(\sum_c \sum_t FIC_c \times ZC_{ct} \right) + \left(\sum_j \sum_t CTT_j \times TQT_{jt} \right) \\ & + R \times \left(\sum_i \sum_c \sum_t DIC_{ic} \times Y_{ict} + \sum_i \sum_j \sum_t DIT_{ij} \times YT_{ijt} \right) \quad (1) \\ & + RT \times \left(\sum_c \sum_d \sum_t DID_{cd} \times Q_{cdt} + \sum_j \sum_d \sum_t DIDT_{jd} \times QT_{jdt} \right) \\ & + \left(\sum_i \sum_t CO_i \times DE_{it} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} MinZ_2 = & \sum_c \sum_t PbAA_c \times TQ_{ct} \times Pop_c + \sum_j \sum_t PbAA_j \times TQT_{jt} \times Pop_j \\ & + \sum_i \sum_c \sum_t PbA_{ic} \times Y_{ict} \times Popr_{ic} + \sum_i \sum_j \sum_t PbA_{ij} \times YT_{ijt} \times Popr_{ij} \end{aligned}$$

$$MinZ_3 = \max_i \sum_t (WUW_i \times UQ_{it})$$

Constraints:

$$UQ_{i(t-1)} + DE_{it} = \sum_c Y_{ict} + \sum_j YT_{ijt} + UQ_{it} \quad \forall i, t \quad (4)$$

Eq. (4) balances the flow between MWGCs, ETCs, and TTCs.

$$\sum_i Y_{ict} \leq CAC_c \times ZC_{ct} \quad \forall c, t \quad (5)$$

$$\sum_i Y_{ict} = TQ_{ct} \quad \forall c, t \quad (6)$$

$$\sum_i YT_{ijt} \leq CACT_j \times ZCT_{jt} \times W_j \quad \forall j, t \quad (7)$$

$$\sum_i YT_{ijt} = TQT_{jt} \quad \forall j, t \quad (8)$$

Eqs. (5) and (7) guarantee that the inflow of waste to ETCs and TTCs is less than or equal to their capacity. Equality of the inflow and outflow to and out of ETCs and TTCs are assured in Eqs. (6) and (8), respectively.

$$Q_{cdt} = TQ_{ct} \quad \forall c, d, t \quad (9)$$

$$QT_{jdt} = TQT_{jt} \quad \forall j, d, t \quad (10)$$

Eqs. (9) and (10) guarantee that the outflow of treated waste from ETCs and TTCs is equal to its inflow to SL, respectively.

$$\begin{aligned} W_j, ZCT_{jt}, ZC_{ct}, INS_j \in \{0, 1\} \quad \forall j, c, t \\ Y_{ict}, YT_{ijt}, TQ_{ct}, TQT_{jt}, Q_{cdt}, QT_{jdt}, UQ_{it} \geq 0 \quad \forall i, c, j, d, t \end{aligned} \quad (11)$$

Finally, Eq. (11) shows the characteristics of the decision variables.

$$UQ_{i(t-1)} + DE_{it} = \sum_c Y_{ict} + \sum_j YT_{ijt} + UQ_{it} \quad \forall i, t$$

Waste generation function

$PopC_i$	Population that is covered by MWGC i
IR_t	Infection rate for COVID-19 in period t
PRH_t	Percentage of patients that attend to hospitals in period t
PH_t	Probability of getting hospitalized in period t
NPH_{it}	Number of patients that are under medical attention in hospital i and period t
Re_t	Recovery rate in period t
Mu_t	Mortality rate in period t
Qp_{it}	Amount of generated waste by each patient in MWGC i and period t
Pc_t	Percentage of patients that attend clinics in period t
MS_t	Percentage of test that is done for diagnosing COVID-19 in period t
PAH_{it}	Number of patients that are home quarantined in RA i and period t

Eqs. (12)–(16) calculate the amount of generated waste in ho clinics, laboratories, RAs, and cemeteries in each period, respect

$$DE_{it}^{hospital} = [(PopC_i \times IR_t \times PRH_t \times PH_t) + (NPH_{i(t-1)}) \times (1 - Re_t - M \times Qp_{it})]$$

$$DE_{it}^{clinics} = (PopC_i \times Pc_t) \times Qp_{it}$$

$$DE_{it}^{laboratories} = (PopC_i \times MS_t) \times Qp_{it}$$

$$DE_{it}^{residential\ area} = [PopC_i \times IR_t \times (PRH_t \times (1 - PH_t) + Pc_t) + PAH_{i(t-1)} \times (1 - Re_t)] \times Qp_{it}$$

$$DE_{it}^{cemetery} = (PopC_i \times IR_t \times Mu_t) \times Qp_{it}$$

The number of patients under medical attention in hospital i in period t and the number of patients that are home quarantined are computed by Eqs. (17) and (18).

$$NPH_{it} = [(PopC_i \times IR_t \times PRH_t \times PH_t) + (NPH_{i(t-1)}) \times (1 - Re_t - M \times Qp_{it})]$$

$$PAH_{it} = [PopC_i \times IR_t \times (PRH_t \times (1 - PH_t) + Pc_t) + PAH_{i(t-1)} \times (1 - Re_t)] \times Qp_{it}$$

Linearization

The proposed model has two different kinds of non-linear term first term is the third objective function of the model that is non through the existence of a max function on the mentioned obj function. A new auxiliary variable should be added to the i Eq. (3) should be substituted by Eq. (19), and a new constr Eq. (20) should be added to the model, so the problem regardi first non-linear term get solved (Molladavoodi et al., 2020).

$$MinZ_3 = MUQ$$

$$MUQ \geq \sum_t WUW_i \times UQ_{it} \quad \forall i \quad (20)$$

$$MUQ \geq 0 \quad (21)$$

The second term is formed by multiplication of two binary variables in the right-hand side of constraint (7), which is transformed into a linear equation through substitution of a new binary variable as WZ_{jt} instead of $ZCT_{jt} \times W_j$. The non-linear constraint of the model is replaced by the constraints given in Eqs. (22)–(25) (Paydar and Saidi-Mehrabad, 2015).

$$\sum_i Y_{ijt} \leq CAPCT_j \times WZ_{jt} \quad \forall j, t \quad (22)$$

$$WZ_{jt} - ZCT_{jt} - W_j + 1.5 \geq 0 \quad \forall j, t \quad (23)$$

$$1.5 \times WZ_{jt} - ZCT_{jt} - W_j \leq 0 \quad \forall j, t \quad (24)$$

$$WZ_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, t \quad (25)$$

Solution approach

$g_{i, \min}, g_{i, \max}$	Lower and upper bound of aspiration level of objective i
R_i	Continuous variable with a lower bound of $g_{i, \min}$ and upper bound of $g_{i, \max}$
w_i	Weight of deviations from the goal of objective i
d_i^+, d_i^-	Positive and negative variation from aspiration level of objective i
p_i	Weight of deviations from upper or lower bound of aspiration level for objective i
e_i^+, e_i^-	Positive and negative variation from upper or lower bound of aspiration level of objective i

The configuration of the RMCGP has two cases regarding the type of objective functions. The first case is called “the less the better” which is presented as follows:

$$Min \sum_{i=1}^I [w_i (d_i^+ + d_i^-) + p_i (e_i^+ + e_i^-)] \quad (26)$$

S. t.

$$g_c(X) = (\leq \geq) 0 \quad (27)$$

$$f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = R_i \quad i = 1, \dots, I \quad (28)$$

$$R_i - e_i^+ + e_i^- = g_{i, \min} \quad i = 1, \dots, I \quad (29)$$

$$g_{i, \min} \leq R_i \leq g_{i, \max} \quad i = 1, \dots, I \quad (30)$$

$$d_i^+, d_i^-, e_i^+, e_i^- \geq 0 \quad i = 1, \dots, I \quad (31)$$

$f_i(X)$ represents the objective function i , and X is the decision vector. Eq. (26) represents the goal of the RMCGP, minimizing the weighted summation of deviations from the aspiration level and the lower bound of aspiration level. Eq. (27) shows the constraints of the system, and Eq. (28) calculates the positive and negative variations from the aspiration level. Eq. (29) computes the positive and negative variations from the lower bound of the aspiration level. Eq. (30) guarantees that aspiration levels are bound to the lower and upper bound. The characteristics of the variables are presented in Eqs. (31).

The second case is called “the more the better”, and its only difference with the first case is that the right-hand side of Eq. (29) would be $g_{i, \max}$. Hence, the model minimizes the positive and negative deviations from the upper bound of the aspiration level.

The mathematical model of the proposed network

$$\begin{aligned} \text{Min} Z_4 = & \left(\frac{w_1}{g_{1, \max} - g_{1, \min}} \right) \times (d_1^+ + d_1^-) + \left(\frac{p_1}{g_{1, \max} - g_{1, \min}} \right) \times (e_1^+ + e_1^-) \\ & + \left(\frac{w_2}{g_{2, \max} - g_{2, \min}} \right) \times (d_2^+ + d_2^-) + \left(\frac{p_2}{g_{2, \max} - g_{2, \min}} \right) \times (e_2^+ + e_2^-) \\ & + \left(\frac{w_3}{g_{3, \max} - g_{3, \min}} \right) \times (d_3^+ + d_3^-) + \left(\frac{p_3}{g_{3, \max} - g_{3, \min}} \right) \times (e_3^+ + e_3^-) \end{aligned} \quad (32)$$

S. t.

Eqs. (4)–(6), (8)–(11), (19)–(25)

$$Z_1 - d_1^+ + d_1^- = R_1 \quad (33)$$

$$R_1 - e_1^+ + e_1^- = g_{1, \min} \quad (34)$$

$$g_{1, \min} \leq R_1 \leq g_{1, \max} \quad (35)$$

$$Z_2 - d_2^+ + d_2^- = R_2 \quad (36)$$

$$R_2 - e_2^+ + e_2^- = g_{2, \min} \quad (37)$$

$$g_{2, \min} \leq R_2 \leq g_{2, \max} \quad (38)$$

$$Z_3 - d_3^+ + d_3^- = R_3 \quad (39)$$

$$R_3 - e_3^+ + e_3^- = g_{3, \min} \quad (40)$$

$$g_{3, \min} \leq R_3 \leq g_{3, \max} \quad (41)$$

$$d_1^+, d_1^-, e_1^+, e_1^-, d_2^+, d_2^-, e_2^+, e_2^-, d_3^+, d_3^-, e_3^+, e_3^- \geq 0 \quad (42)$$

Eq. (32) minimizes the normalized weighted positive and negative variations from the aspiration levels and their lower bounds. Eqs. (33)–(41) calculate the negative and positive variations from their related goals, and their lower bounds, and also guarantee that aspiration levels are bound to their related upper and lower bounds. Finally, the characteristics of the variables are presented in Eq. (42).