

Κυκλική Αξιοποίηση Απορριμμάτων (Waste-to-Product, W-to-P) Αντί Καύσης (Waste-to-Energy, W-to-E)

Του Βασίλη Νικολετόπουλου, Μηχανολόγου-Ηλεκτρολόγου ΕΜΠ, M.Sc. Engineering-Economic Systems Stanford University

Εισαγωγή

Η μετάβαση από ένα γραμμικό μοντέλο ‘παραγωγή-χρήση-απόρριψη’ σε ένα κυκλικό μοντέλο οικονομίας αποτελεί κεντρική προτεραιότητα για την Ευρώπη. Η **κυκλική αξιοποίηση απορριμμάτων** (waste-to-product, W-to-P) σημαίνει μετατροπή των υλικών από απόβλητα σε νέα προϊόντα ή πρώτες ύλες, με διατήρηση της αξίας, μείωση της ανάγκης για πρωτογενείς πρώτες ύλες και ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Το παρόν άρθρο περιγράφει τεχνολογικές και βιομηχανικές εφαρμογές στην Ευρώπη, και συγκρίνει τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά, χρηματοδοτικά και κοινωνικά το (Waste-to-Product, W-to-P) με την καύση/παραγωγή ενέργειας (Waste-to-Energy, W-to-E) -- απαντώντας ταυτόχρονα και στην υπό διαβούλευση ‘Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ) για τη Δημιουργία Δικτύου Μονάδων Ενεργειακής Αξιοποίησης Απορριματογενών Ενεργειακών Πρώτων Υλών (ΑΕΠΥ) από Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)’^[1] η οποία απορρίπτει τις ‘Εναλλακτικές τεχνολογίες (αεριοποίηση και πυρόλυση) [διότι] έχουν πάρα πολλές αποτυχημένες εφαρμογές, λόγω της δυσκολίας τους να διαχειριστούν αξιόπιστα και αποτελεσματικά ανομοιογενή απόβλητα’.

1. Βασικές αρχές της κυκλικής αξιοποίησης

Αυτές είναι ο πρώτον ο Ανασχεδιασμός προϊόντων (design for recycling) δηλ. σχεδιασμός ώστε τα προϊόντα να αποσυναρμολογούνται και να ανακυκλώνονται εύκολα. Δεύτερον η Διαλογή στην πηγή και προδιαλογή δηλ. βελτίωση της ποιότητας των ρευμάτων αποβλήτων (π.χ. διαχωρισμός οργανικών, πλαστικών, χαρτιού). Τρίτον Οι Μηχανικές και χημικές τεχνολογίες ανακύκλωσης: από την κλασική μηχανική ανακύκλωση πλαστικών μέχρι προηγμένες τεχνολογίες όπως η χημική ανακύκλωση πλαστικών και η ανάκτηση χημικών απ' τα οργανικά απόβλητα. Τέλος, οι Κλειστοί βρόγχοι (loops) δηλ. επαναχρησιμοποίηση υλικών στον ίδιο βιομηχανικό κύκλο ή ανοιχτοί βρόγχοι για άλλες εφαρμογές (π.χ. χρησιμοποιημένο πλαστικό ως πρώτη ύλη για οδοστρώματα).

2. Βιομηχανικές εφαρμογές της κυκλικής αξιοποίησης στην Ευρώπη

Κύρια παραδείγματα Κυκλικής Αξιοποίησης Απορριμμάτων αποτελούν: Η Ανακύκλωση πλαστικών (μηχανική & χημική). Η τελευταία περιλαμβάνει μετατροπή πλαστικών (π.χ. πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο, PET) σε μονομερή ή έλαια μέσω πυρόλυσης, γλυκόλυσης ή υδρόλυσης και συνιστάται για μολυσμένα ή μικτού τύπου ρεύματα που δεν ανακυκλώνονται μηχανικά. Η Ανάκτηση οργανικής ύλης — βιοαπόβλητα σε προϊόν, δηλ. Κομποστοποίηση & αναερόβια χώνευση (AD): παραγωγή κομπόστ, υλικό έδαφος, και βιοαέριο (το οποίο μπορεί να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο) – για χρήση σε γεωργία, ενεργειακές ανάγκες ή χημικές πρώτες ύλες, με βιοανταγωνιστικά προϊόντα όπως βιοπλαστικά, λιπάσματα βραδείας απελευθέρωσης (slow release) και βιοδραστικά συστατικά από υπολείμματα τροφίμων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η **Παραγωγή συνθετικού αερίου (syngas) και δευτερογενών καυσίμων** μέσω αεριοποίησης απορριμμάτων (π.χ. οργανικών, πλαστικών ή μιγμάτων RDF) οπότε παράγεται συνθετικό αέριο (syngas), μίγμα CO και H₂. Από το syngas μπορεί να παραχθεί μεθανόλη, αιθανόλη, συνθετικά καύσιμα αεροπορίας (SAF), υδρογόνο και άλλες χημικές πρώτες ύλες. Εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής στην Ευρώπη περιλαμβάνουν έργα στην Ιταλία, Γερμανία, Ολλανδία, Ηνωμένο Βασίλειο, όπου η αεριοποίηση αποβλήτων, αστικών και άλλων, χρησιμοποιείται για παραγωγή καυσίμων χαμηλού άνθρακα όπως μεθανόλη, αιθανόλη και SAF, υποκαθιστώντας συμβατικά ορυκτά καύσιμα.

Πλεονέκτημα της κυκλικής αξιοποίησης είναι η υψηλή απόδοση στην ενεργειακή μετατροπή και δυνατότητα παραγωγής προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας αντί για απλή ηλεκτροπαραγωγή.

3. Τεχνικά πλεονεκτήματα έναντι της καύσης (Waste-to-Energy)

Στα πλεονεκτήματα της Κυκλικής Αξιοποίησης Απορριμμάτων (Waste-to-Product) αντί της Καύσης (Waste-to-Energy) περιλαμβάνονται η Διατήρηση υλικής αξίας καθώς η waste-to-product διατηρεί την αξία των υλικών (π.χ. πλαστικό→πλαστικό), ενώ η καύση καταστρέφει τις μοριακές δομές και την δυνατότητα επανεπεξεργασίας. Η Ευελιξία στην παραγωγή προϊόντων διότι τα απόβλητα μετατρέπονται σε πρώτες ύλες για ποικιλία προϊόντων (δομικά, χημικά, γεωργικά), όχι μόνο ενέργεια. Η Μειωμένη ενεργειακή ένταση (energy intensity) διότι για ορισμένα υλικά (π.χ. αλουμίνιο, πλαστικά) η ανακύκλωση απαιτεί λιγότερη ενέργεια σε σχέση με την παραγωγή από πρώτες ύλες ή με το ενεργειακό ισοδύναμο της καύσης + απόδοση. Η Βελτιωμένη ποιότητα εδαφών και πόρων καθώς η παραγωγή οργανικών λιπασμάτων/κομπόστ βελτιώνει τη γονιμότητα, κάτι που η καύση δεν προσφέρει.

4. Περιβαλλοντικά οφέλη της Κυκλικής Αξιοποίησης Απορριμμάτων

Κατά πρώτον, οι Χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου -- όταν λαμβάνεται υπόψη ολόκληρος κύκλος ζωής, το Waste-to-Product συχνά μειώνει τις συνολικές εκπομπές CO₂e σε σχέση με την καύση, ειδικά αν αντικαθιστά παραγωγή νέων πρώτων υλών. Δεύτερο περιβαλλοντικό όφελος είναι η Μείωση διαρροών ρύπων και τοξικών καταλοίπων -- η καύση μπορεί να παράγει τέφρα, διοξίνες/φουράνια (αν και οι σύγχρονες μονάδες ελέγχου μειώνουν αυτούς τους κινδύνους), ενώ οι διαδικασίες ανακύκλωσης μειώνουν τη συσσώρευση τοξικών στην αλυσίδα. Τρίτον, η Διατήρηση φυσικών πόρων με τη μείωση εξόρυξης και παραγωγής πρώτων υλών. Τέλος, Κυκλικό νερό και μειωμένη χρήση ενέργειας, μια και σε κάποιες διεργασίες ανακύκλωσης μπορεί να απαιτείται νερό και ενέργεια, αλλά συνολικά η εξοικονόμηση πόρων είναι σημαντική.

Σημειώνονται επίσης θέματα ασυμβατότητας της καύσης με το Περιφερειακό Σχέδιο Διαχείρισης Απορριμμάτων (ΠΕΣΔΑ) και το Περιφερειακό Χωροταξικό Πλαίσιο (ΠΧΠ) συγκεκριμένων περιφερειών, καθώς και αναντιστοιχίας με την Οδηγία 2001/42/ΕΚ.

5. Οικονομικές πτυχές

Τα Οφέλη της Κυκλικής Αξιοποίησης Απορριμμάτων περιλαμβάνουν τη Δημιουργία νέων αγορών και θέσεων εργασίας διότι οι βιομηχανίες ανακύκλωσης και δευτερογενών προϊόντων συχνά δημιουργούν περισσότερες τοπικές θέσεις εργασίας ανά τόνο από την καύση. Κατά δεύτερον, την Ανάκτηση αξίας καθώς οι δευτερογενείς πρώτες ύλες μειώνουν το κόστος

παραγωγής για επιχειρήσεις που τις ενσωματώνουν. Τρίτον η Μείωση εξάρτησης από εισαγόμενες πρώτες ύλες η οποία είναι θετική για την ανταγωνιστικότητα της βιομηχανίας.

Δύο ακόμη σημαντικά οφέλη της Κυκλικής Αξιοποίησης Απορριμμάτων είναι πρώτον η Αποφυγή κόστους εκπομπών ETS, δεδομένου ότι, σε αντίθεση με την καύση απορριμμάτων που υπόκειται στο Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU ETS), η κυκλική αξιοποίηση αποφεύγει την επιβάρυνση από τις τιμές CO₂, ενισχύοντας την οικονομική βιωσιμότητα της συγκεκριμένης μεθόδου. Δεύτερον, η Ενεργειακή επάρκεια δικτύου μια και η ηλεκτρική ενέργεια από W-to-E δεν είναι πάντα αναγκαία στο δίκτυο — ειδικά σε περιόδους υπερπαραγωγής από ΑΠΕ, η παραγωγή της μπορεί να περικόπτεται, μειώνοντας την πραγματική αξία της.

Τέλος, η Κυκλική Αξιοποίηση Απορριμμάτων αναγνωρίζεται στο Ευρωπαϊκό Taxonomy, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα Ευρωπαϊκής χρηματοδότησης των σχετικών επενδυτικών σχεδίων, σε αντίθεση με την καύση η οποία οδηγεί σε χρήση αποκλειστικά Εθνικών Πόρων.

Για την πληρότητα του άρθρου, επισημαίνουμε ότι υπάρχουν και οι εξής Προκλήσεις/Κίνδυνοι για την καύση. Κατ' αρχάς το Κόστος πρωτογενούς επένδυσης, καθώς οι τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης και μονάδες αξιοποίησης συχνά χρειάζονται υψηλές αρχικές επενδύσεις -- το μειονέκτημα, όμως, αυτό μπορεί να αντισταθμίζεται από την ευκολία χρηματοδότησης ως άνω. Η Οικονομική αστάθεια τιμών δευτερογενών πρώτων υλών είναι μία άλλη πρόκληση καθώς όταν οι τιμές πετρελαίου/νέων υλικών είναι χαμηλές, η δευτερογενής αγορά πιέζεται. Τέλος το Κόστος συλλογής και διαλογής καθώς χωρίς καλά δίκτυα διαλογής, η ποιότητα των ρευμάτων μειώνεται και αυξάνεται το κόστος.

6. Κοινωνική αποδοχή και πολιτισμικοί παράγοντες

‘Last but not least’, επισημαίνεται η κεφαλαϊώδης σημασία της Αποδοχής των τοπικών κοινοτήτων, δεδομένου ότι μονάδες ανακύκλωσης κατά κανόνα αντιμετωπίζουν λιγότερη αντίσταση από μονάδες καύσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται έντονα για την υπό διαβούλευση ‘Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ)...’^[1]. Κατά κανόνα η αποδοχή εξαρτάται από διαφάνεια, συμμετοχή της κοινότητας και σωστή διαχείριση οσμών/θορύβου/εκπομπών – αλλά πρωτίστως από την επιλογή φιλικής προς το περιβάλλον τεχνολογίας.

7. Συνοπτική Σύγκριση: Waste-to-Product vs Waste-to-Energy

Τεχνικά: Το W-to-P επιτρέπει επαναχρησιμοποίηση μοριακής/υλικής δομής καθώς το W-to-E παράγει ενέργεια αλλά καταστρέφει υλικά. Για ορισμένα ρεύματα δεν υπάρχει εναλλακτική (π.χ. υπολειμματικά μολυσμένα υλικά), οπότε το W-to-E παίζει ρόλο ως τελευταία επιλογή.

Περιβαλλοντικά: Σε συνολικό κύκλο ζωής, το W-to-P τείνει να έχει μικρότερο αποτύπωμα CO_{2e} ειδικά όταν αντικαθιστά παραγωγή πρώτων υλών. Το W-to-E μπορεί να προσφέρει μείωση αναθεματικής υγειονομικής ταφής (landfill diversion) και παραγωγή ενέργειας αλλά με συνεπακόλουθα απόβλητα (τέφρα) και απώλεια υλικής αξίας. Επίσης, το W-to-P είναι συμβατό με το Περιφερειακό Σχέδιο Διαχείρισης Απορριμμάτων (ΠΕΣΔΑ) και με το Περιφερειακό Χωροταξικό Πλαίσιο (ΠΧΠ) συγκεκριμένων περιφερειών, και σε αντιστοιχία με την Οδηγία 2001/42/EK.

Οικονομικά: Το W-to-P δημιουργεί νέα οικονομικά οφέλη και θέσεις εργασίας, αποφεύγει το κόστος ETS και τους περιορισμούς δικτύου. Η μεγαλύτερη ευκολία σε χρηματοδότηση εξισορροπεί το ψηλότερο CAPEX σε διαλογή, τεχνολογία και αγορά δευτερογενών υλικών. Το W-to-E μπορεί να προσφέρει μεν σταθερή ροή ενέργειας και έσοδα, εξαρτάται όμως από τιμές ενέργειας, πολιτικές και τη ζήτηση στο δίκτυο πχ περικοπές.

Κοινωνικά: Το W-to-P συνήθως βρίσκει πιο θετική αποδοχή κοινοτήτων και καταναλωτών όταν οι διαδικασίες είναι διαφανείς και τα τελικά προϊόντα πληρούν ποιότητα. Το W-to-E αντιμετωπίζει συχνά εντονότερες αντιδράσεις λόγω φόβων για ρύπους, παρά τις σύγχρονες τεχνολογίες απορρύπανσης.

Συμπέρασμα

Αντίθετα με τα συμπεράσματα της υπό Διαβούλευση μελέτης, η κυκλική αξιοποίηση απορριμμάτων (waste-to-product) προσφέρει σημαντικά τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αποκλειστική εξάρτηση από την καύση (waste-to-energy).

Ενώ η καύση διατηρεί ρόλο ως λύση τελικής απόθεσης και παραγωγής ενέργειας σε συγκεκριμένα ρεύματα, η προτεραιοποίηση της επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης δημιουργεί πιο ανθεκτικές εφοδιαστικές αλυσίδες, μειώνει εκπομπές, προσφέρει πρόσβαση σε Ευρωπαϊκή χρηματοδότηση και ενισχύει την τοπική οικονομία.

[1] https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2025/08/SMPE_Energeiaki_Axiopoiisi.pdf