



ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΟΜΙΛΗΣ



**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΟΜΙΛΗΣ
Καθηγητής
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

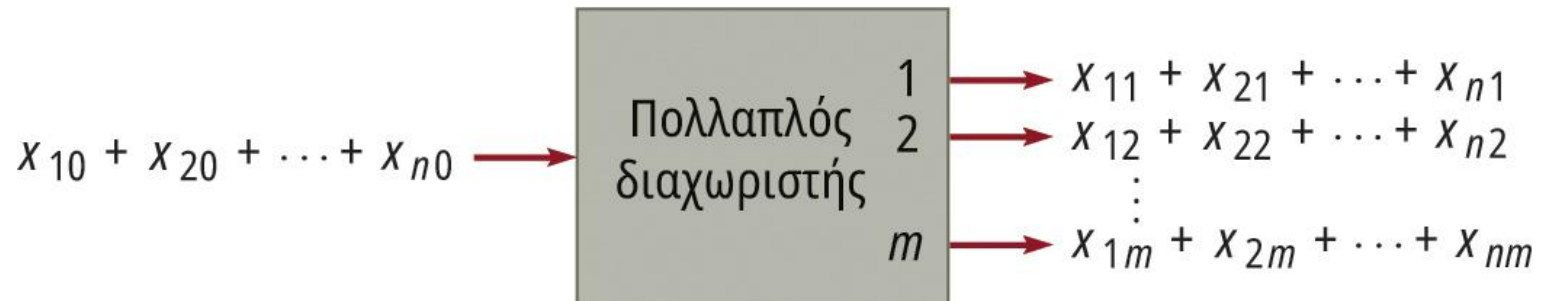
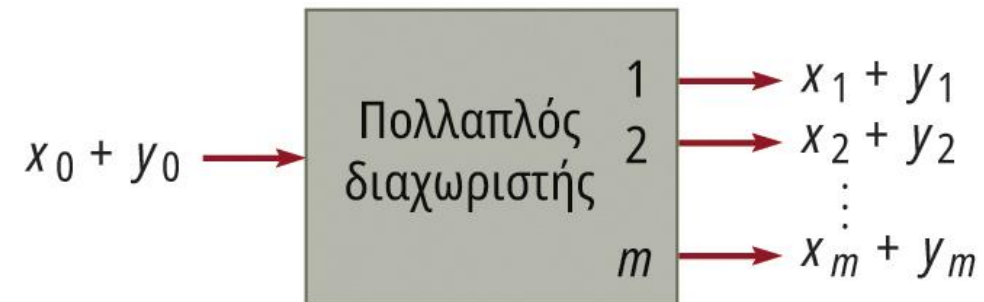
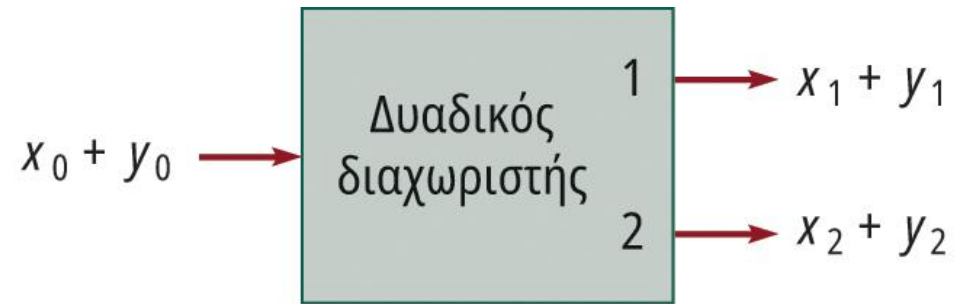
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Διαχωρισμός υλικών από μίγματα

Θετικός διαχωρισμός: Ανάκτηση υλικών από ένα ρεύμα με στόχο την περαιτέρω επεξεργασία τους (π.χ. ανάκτηση αλουμινίου από ένα ρεύμα μικτών ανακυκλώσιμων).

Αρνητικός διαχωρισμός: Απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών (επιμολύνσεων) από ένα ρεύμα ανακυκλώσιμων που έχουν προηγουμένως διαχωρισθεί στην πηγή με χωριστή συλλογή.

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία



Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Βασικές αρχές διαχωρισμού

Ανάκτηση (R, recovery): Η ανάκτηση R του κλάσματος x1 ορίζεται ως: $R_{x_1} = (x_1/x_0) \times 100$. Αυτό μας λέει πόσο από το x καταλήγει στο ρεύμα 1. Με τον ίδιο τρόπο, μπορεί να οριστεί και η ανάκτηση του x στο ρεύμα x2, το οποίο θα οριζόταν ως R_{x_2} . X_0 είναι το άθροισμα $x_1 + x_2$. Ομοίως $y_0 = y_1 + y_2$.

Καθαρότητα (P, purity): Η καθαρότητα P έχει να κάνει με το ποσοστό του κάθε συστατικού (x, y) στο κάθε ρεύμα εξόδου, δηλαδή τα ρεύματα 1 ή 2 (όσον αφορά το δυαδικό διαχωριστή, αριστερό σχήμα). Για το x λοιπόν, η καθαρότητα στο ρεύμα 1 ορίζεται ως: $P_{x_1} = [x_1/(x_1 + y_1)] \times 100$.

Απόδοση (E, efficiency): Συνδυάζει μαζί το R και το P και εξάγει μια συνολική τιμή E που χαρακτηρίζει συνολικά τον διαχωριστή.

$$E(\%) = \left| \frac{x_1}{x_0} - \frac{y_1}{y_0} \right| = \left| \frac{x_2}{x_0} - \frac{y_2}{y_0} \right|$$

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Παράδειγμα υπολογισμών

Σε ένα δυαδικό διαχωριστή (π.χ. μια σχάρα) εισέρχονται 1.000 kg απορριμμάτων ανά ώρα. Τα 600 καταλήγουν στο ρεύμα 1 (χονδρόκοκκο) και 400 στο ρεύμα 2 (λεπτόκοκκο). Από τα 600 του ρεύματος 1, το x είναι 550 (x_1) ενώ 70 από το x καταλήγουν στο ρεύμα 2 (x_2). Υπολογίστε τα R, P, E.

$$x_0 = x_1 + x_2 = 550 + 70 = 620$$

$$\text{Ρεύμα 1} = x_1 + y_1 = 600$$

$$\text{Ρεύμα 2} = x_2 + y_2 = 400$$

$$y_1 = 600 - 550 = 50$$

$$y_2 = 400 - 70 = 330$$

$$y_0 = y_1 + y_2 = 50 + 330 = 380$$

$$R_{x1} = 550 / 620 = 88\%$$

$$R_{x2} = 70 / 620 = 12\%$$

$$R_{y1} = 50 / 380 = 13,2\%$$

$$R_{y2} = 330 / 380 = 86,8\%$$

$$P_{x1} = 550 / (550 + 50) = 91,7\%$$

$$P_{x2} = 70 / (70 + 330) = 17,5\%$$

$$P_{y1} = 50 / (550 + 50) = 8,3\%$$

$$P_{y2} = 330 / (70 + 330) = 82,5\%$$

$$E = \left| \frac{550}{620} - \frac{50}{380} \right| = 75\%$$

$$E = \sqrt{\frac{550}{620} \times \frac{330}{380}} = 88\%$$

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Παράδειγμα υπολογισμών

Σε ένα δυαδικό διαχωριστή (π.χ. μια σχάρα) εισέρχονται 1.000 kg απορριμμάτων ανά ώρα. Τα 600 καταλήγουν στο ρεύμα 1 (χονδρόκοκκο) και 400 στο ρεύμα 2 (λεπτόκοκκο). Από τα 600 του ρεύματος 1, το x είναι 550 (x_1) ενώ 70 από το x καταλήγουν στο ρεύμα 2 (x_2). Υπολογίστε τα R , P , E .

$$x_0 = x_1 + x_2 = 550 + 70 = 620$$

$$\text{Ρεύμα 1} = x_1 + y_1 = 600$$

$$\text{Ρεύμα 2} = x_2 + y_2 = 400$$

$$y_1 = 600 - 550 = 50$$

$$y_2 = 400 - 70 = 330$$

$$y_0 = y_1 + y_2 = 50 + 330 = 380$$

$$R_{x1} = 550 / 620 = 88\%$$

$$R_{x2} = 70 / 620 = 12\%$$

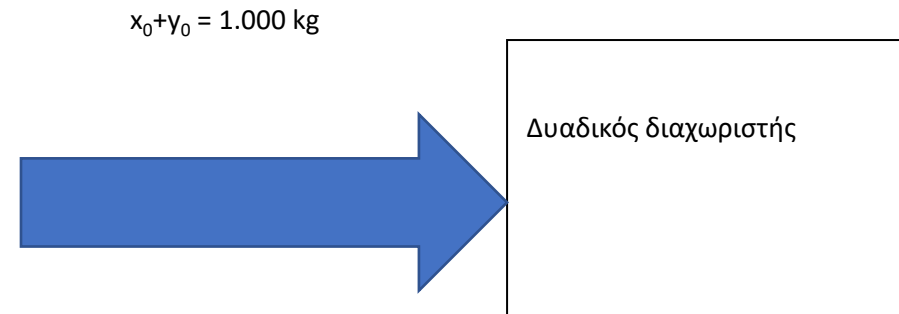
$$R_{y1} = 50 / 380 = 13,2\% \quad R_{y2} = 330 / 380 = 86,8\%$$

$$P_{x1} = 550 / (550 + 50) = 91,7\%$$

$$P_{x2} = 70 / (70 + 330) = 17,5\%$$

$$P_{y1} = 50 / (550 + 50) = 8,3\%$$

$$P_{y2} = 330 / (70 + 330) = 82,5\%$$



Χονδρόκοκκο (oversized)

$$x_1 = 550 \text{ kg}, y_1 = 50 \text{ kg}$$

Λεπτόκοκκο (undersized)

$$x_2 = 70 \text{ kg}, y_2 = 330 \text{ kg}$$

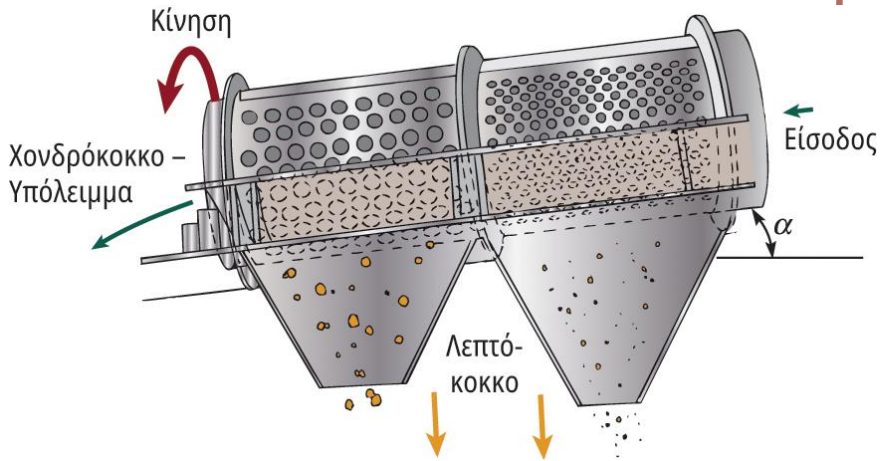
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Κατηγορίες μηχανικού – φυσικού διαχωρισμού

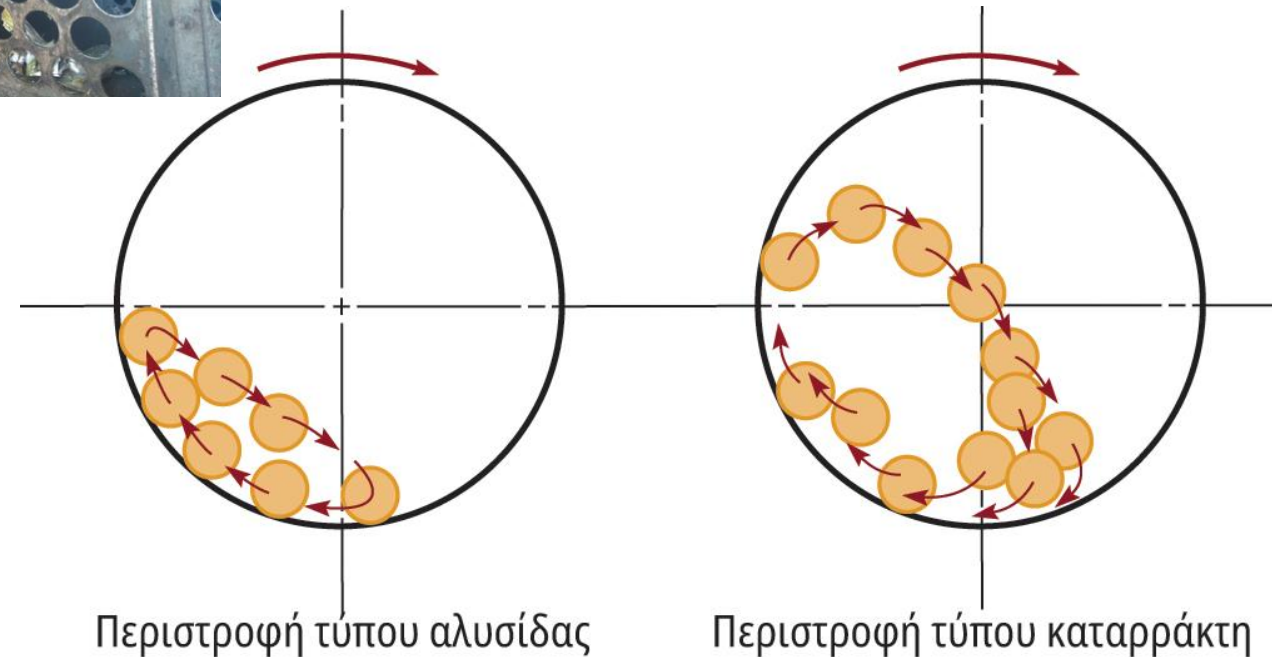
Διαχωρισμός βάσει	Μέσο
Μεγέθους	Σχάρες (π.χ. περιστρεφόμενα κόσκινα, δονητικές σχάρες, σχάρες τύπου δίσκου)
Επιφάνειας/βάρους	Βαλλιστικός διαχωριστής
Χρώματος/ιδιοτήτων επιφάνειας	Οπτικός διαχωριστής
Βάρους	Αεροδιαχωριστής
Άλλων ιδιοτήτων	Διαχωριστές: Μαγνητικοί, Επαγωγικοί (Eddy current), Χειρωνακτικός

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Περιστρεφόμενο κόσκινο (trommel screen)



Χρόνος παραμονής: 30-60 sec, 5-6 περιστροφές μέσα στη σχάρα, 95-100% ανάκτηση για κλάσμα <75 mm με ρυθμό 2 t/h, 91% ανάκτηση για κλάσμα <75 mm ΑΣΑ σε ρυθμό εισόδου τα 2,5 t/h.

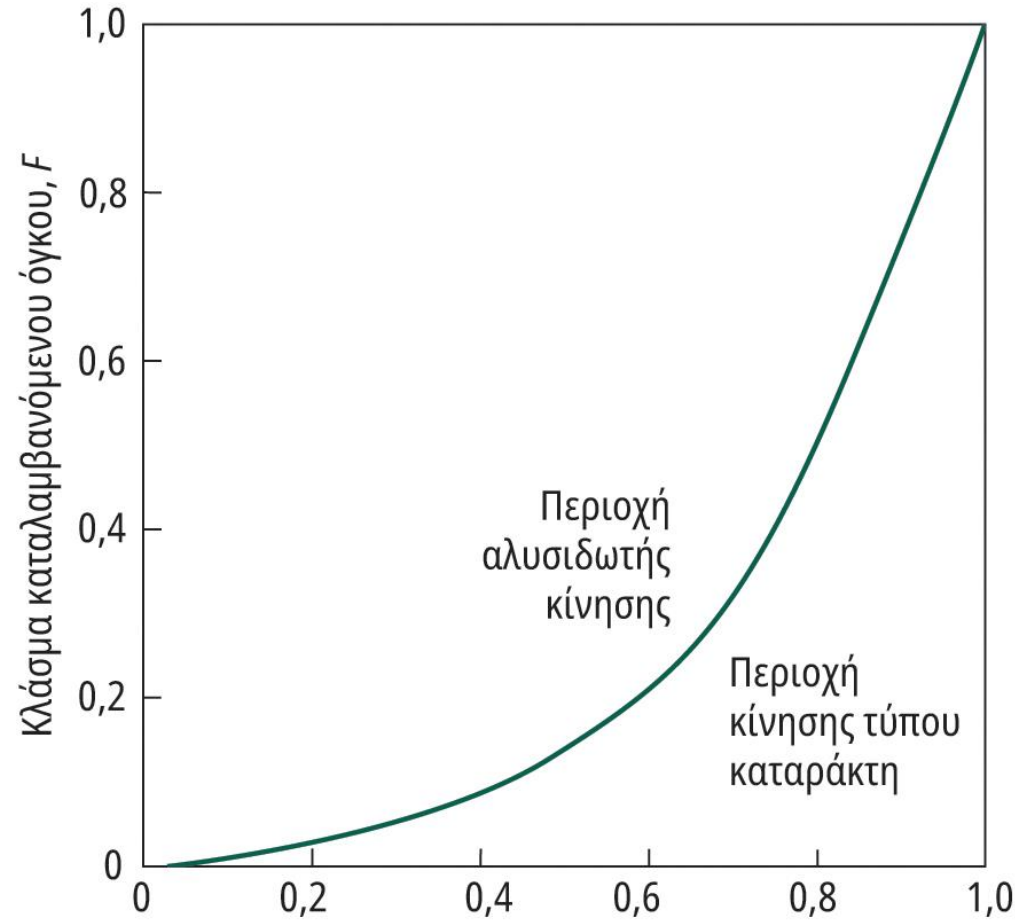


Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

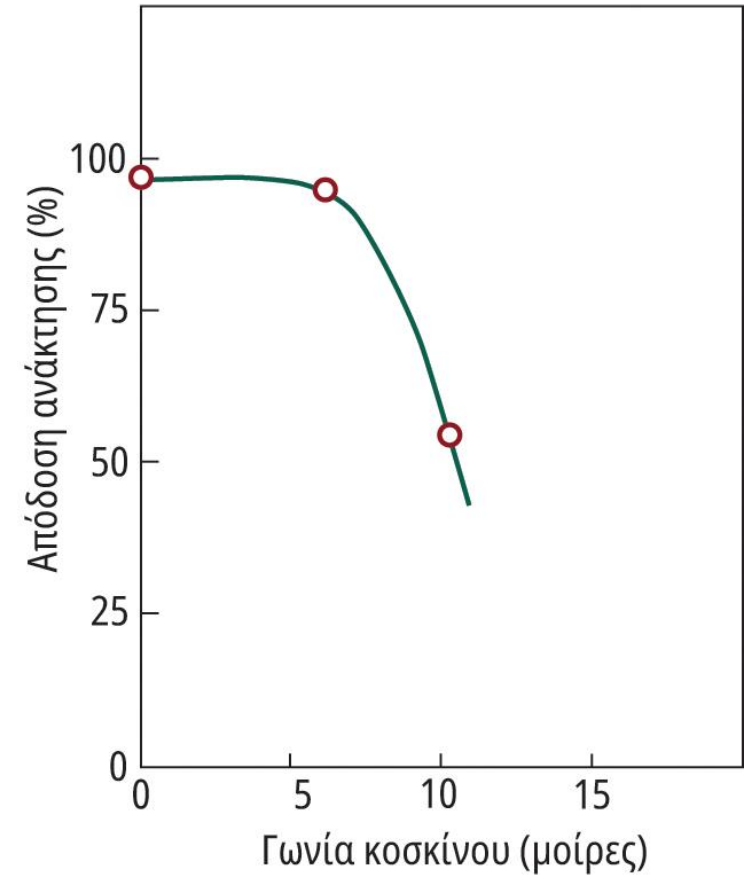
Κρίσιμες
σχεδιαστικές
παράμετροι σε
περιστρεφόμενο
κόσκινο

n_c = Εκείνη η ταχύτητα του κόσκινου, άνω της οποίας, τα σωματίδια εφάπτονται πάνω στη σχάρα λόγω φυγόκεντρου δύναμης και ο διαχωρισμός είναι πολύ μικρός έως μηδενικός

$$F = S/V$$



$$\frac{\text{Ταχύτητα κοσκίνου}}{\text{Κρίσιμη ταχύτητα κοσκίνου}} = \frac{n}{n_c}$$



Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Παράδειγμα σχεδιασμού περιστρεφόμενου κόσκινου

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία ροή σύμμεικτων απορριμμάτων ίση με 150 t/h η οποία εισέρχεται σε ένα περιστρεφόμενο κόσκινο διαμέτρου 2,5 m. Το κόσκινο είναι μεγέθους οπών 80 mm και θα λειτουργεί στο 80% της κρίσιμης ταχύτητάς του. Θεωρήστε πυκνότητα απορριμμάτων ίση με 300 kg/m³ και θεωρήστε ότι το κόσκινο δουλεύει στα όρια μεταξύ περιστροφής τύπου «καταρράκτη» και τύπου «αλυσίδας». Πρακτικοί κανόνες μας λένε επίσης ότι ένας βέλτιστος χρόνος παραμονής σύμμεικτων ΑΣΑ σε ένα κόσκινο κυμαίνεται από 30-60 sec (ας θεωρήσουμε τα 45 sec ως μέση τιμή εδώ).

Λύση

Το κόσκινο θα πρέπει να λειτουργεί στο 80% της κρίσιμης ταχύτητας, δηλαδή στις 80% × 27 = 22 rpm. Το σχήμα 5.4 μας λέει ότι το F που αντιστοιχεί στο 0,8 είναι περίπου 0,5. Δηλαδή, το 50% του ωφέλιμου όγκου του κοσκίνου θα είναι «γεμάτο» με απορρίμματα. Ο ωριαίος όγκος των απορριμμάτων (θεωρώντας μία πυκνότητά τους εντός του κοσκίνου ίση με 0,3 t/m³, είναι:

$$(150 \text{ t/h}) / (0,3 \text{ t/m}^3) = 500 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T = V/Q \Rightarrow V = T \times Q \Rightarrow V = [45 \text{ sec} / (60 \times 60)] \times 500 \text{ m}^3/\text{h} =$$

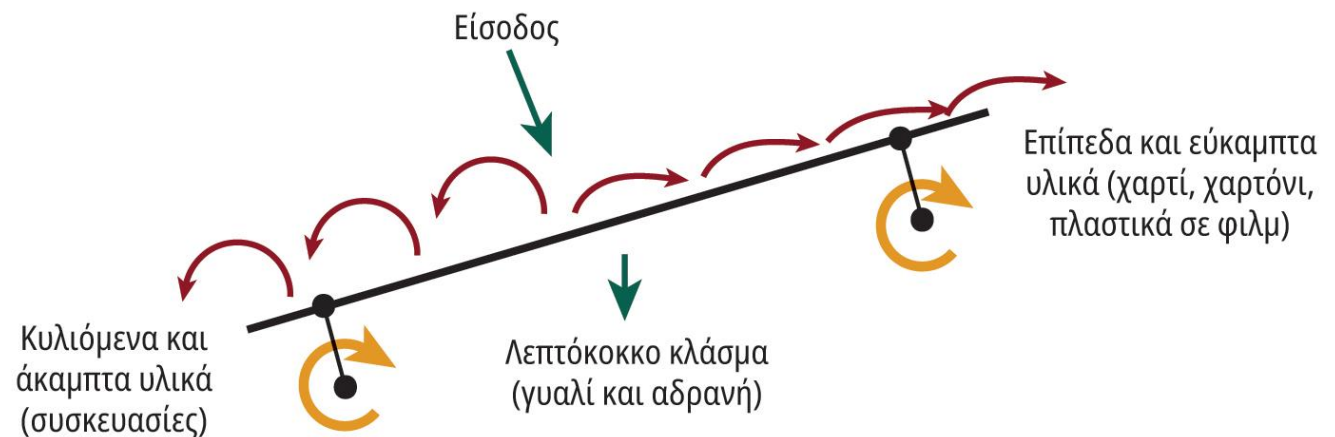
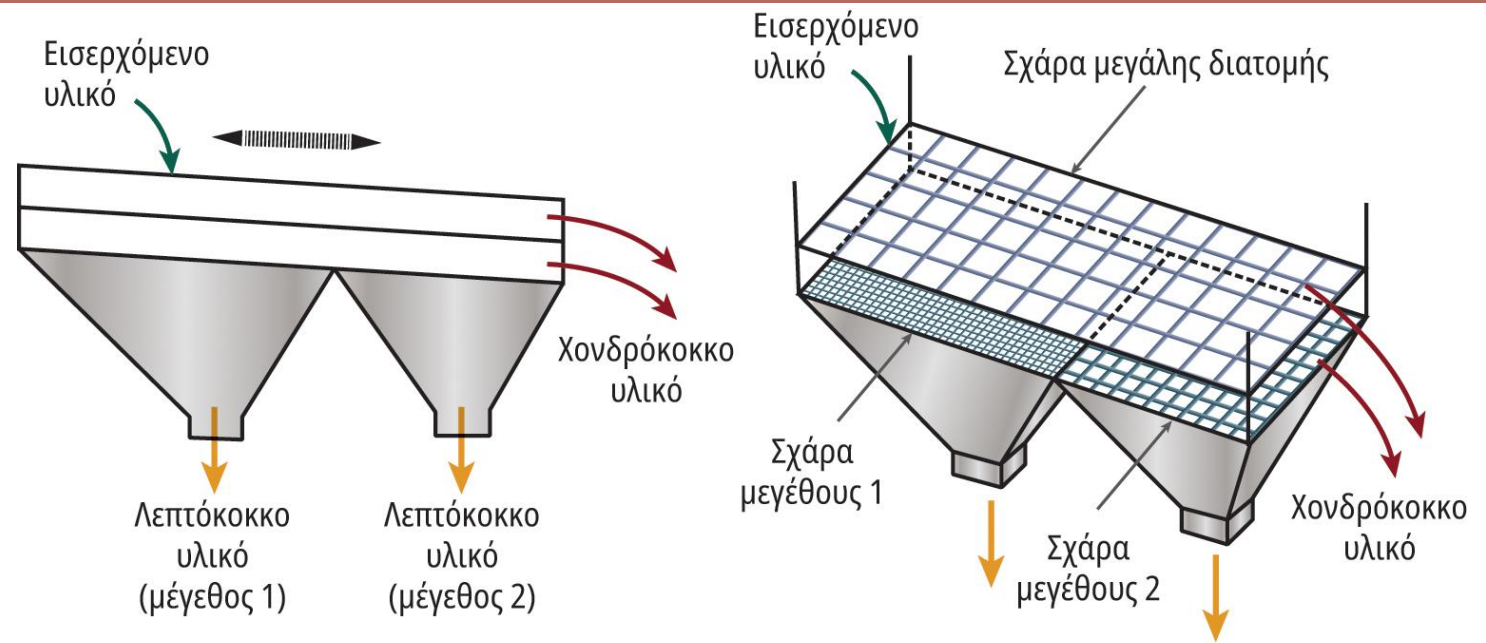
$$6,3 \text{ m}^3, \text{ Όγκος κόσκινου: } 6,3 / 50\% = 12,6 \text{ m}^3$$

$$[12,6 / (\pi \times d^2 / 4)] = 12,6 / 4,9 = 2,6 \text{ m}$$

$$n_c = \sqrt{\frac{g}{4 \times \pi^2 \times r}} = \sqrt{\frac{980}{4 \times \pi^2 \times \left(\frac{250}{2}\right)}} \\ = 0,45 \text{ στροφές ανά δευτερόλεπτο (rotations per sec)} \\ = 27 \text{ rpm}$$

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Άλλα είδη εσχαρών



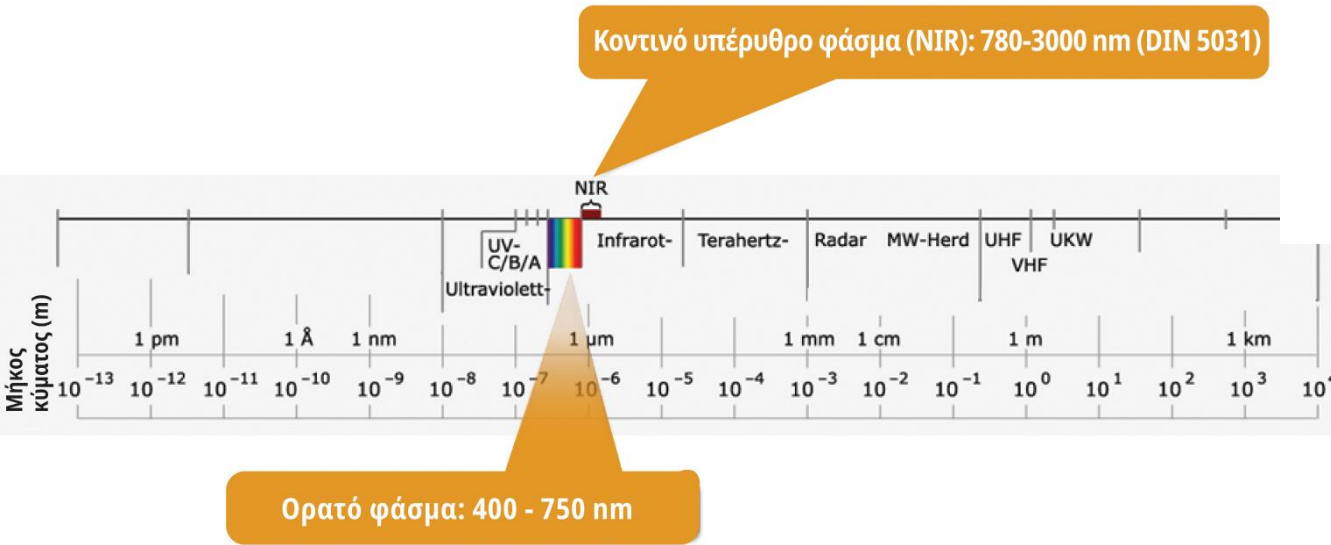
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Σχάρα τύπου δίσκων

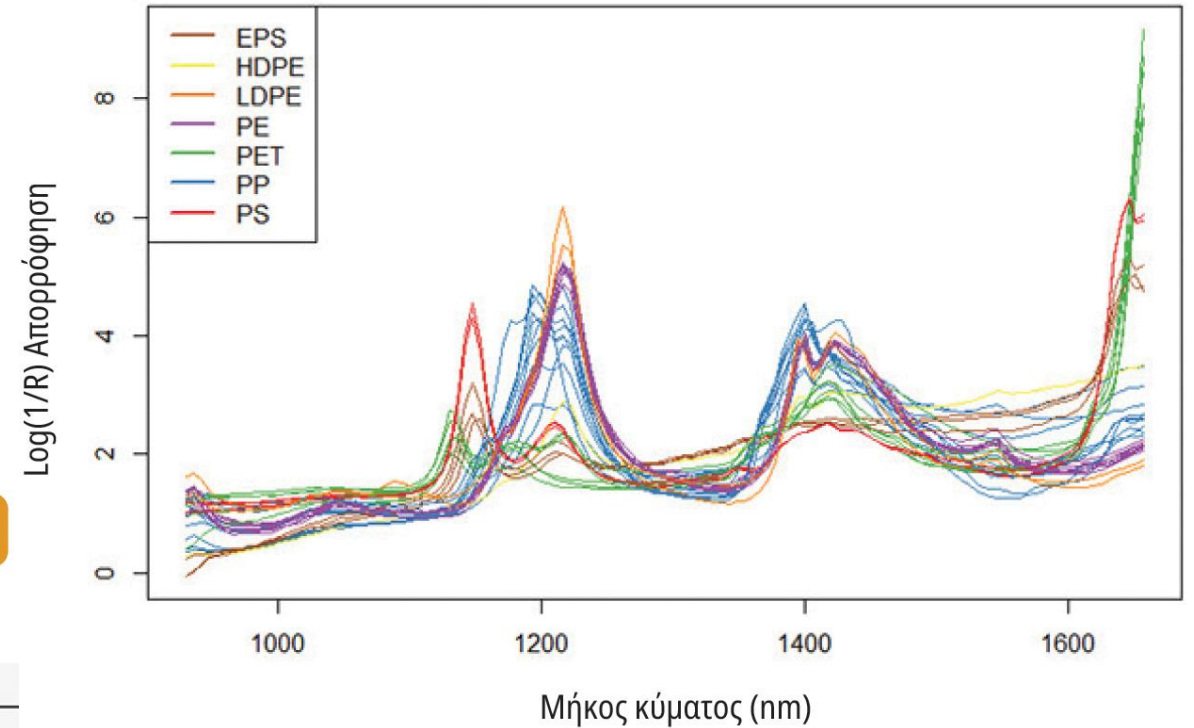


Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Οπτικός διαχωρισμός – Αρχές

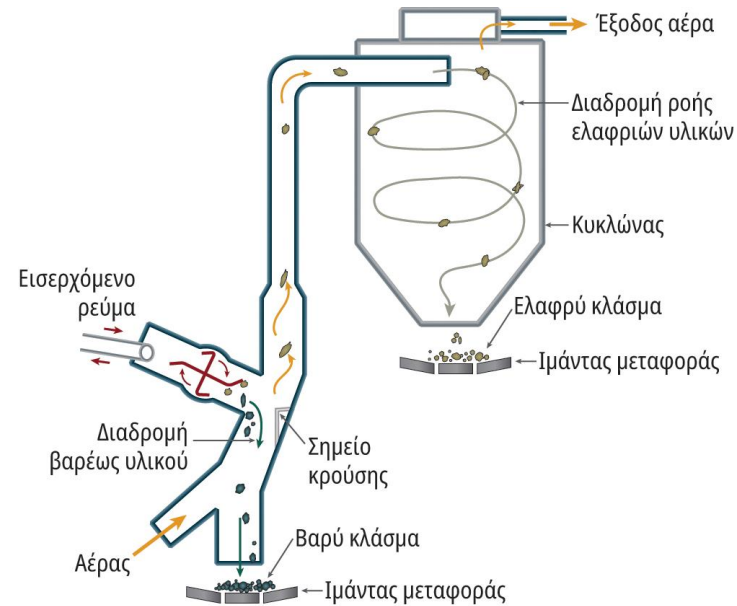


Κανονικοποιημένο φάσμα για διαφορετικά πλαστικά

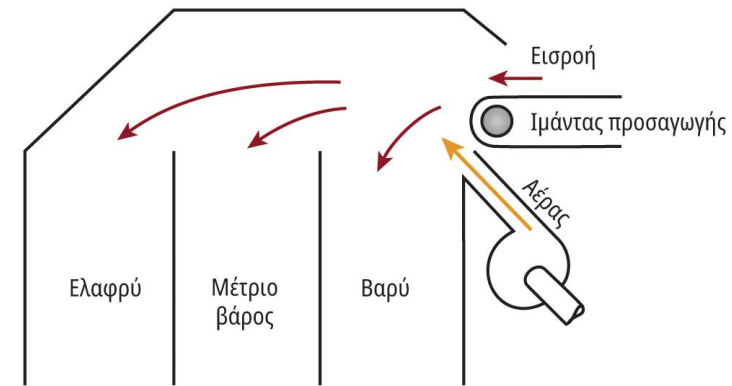


Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Κυκλώνες – Αεροδιαχωρισμός συστατικών συναρτήσει βάρους



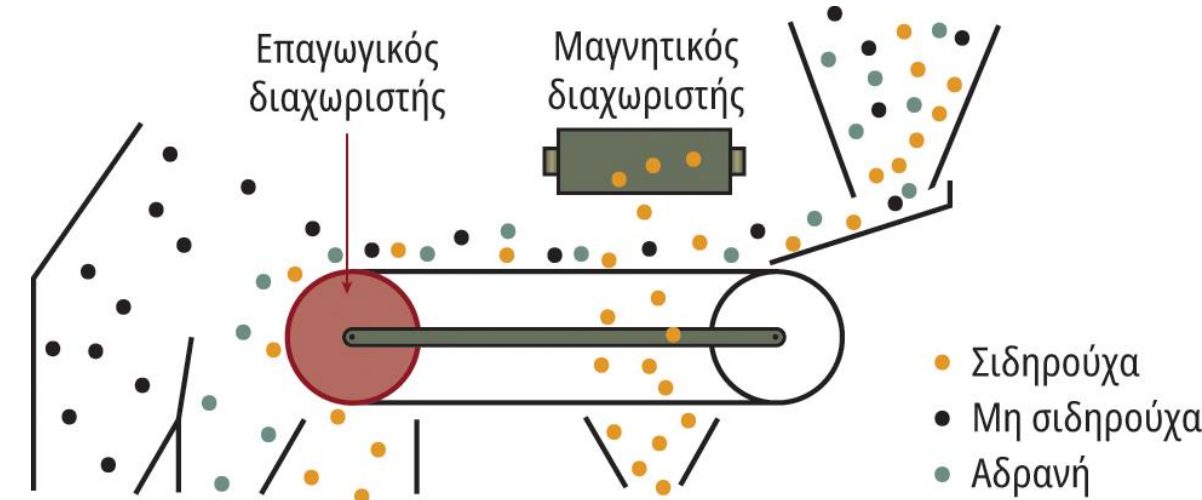
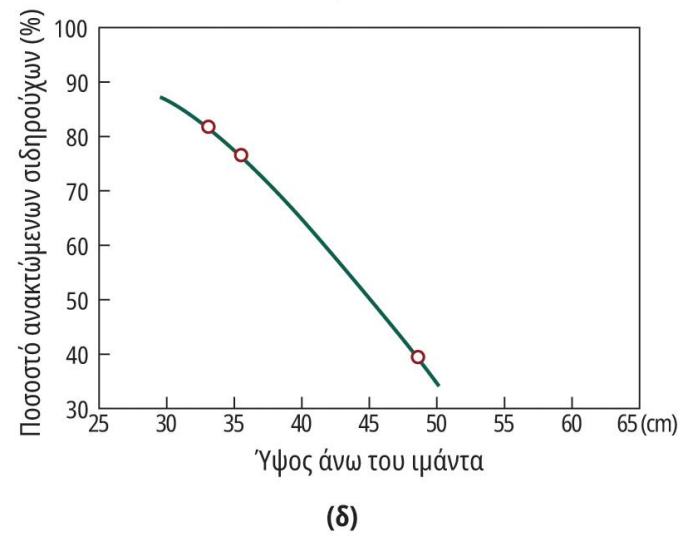
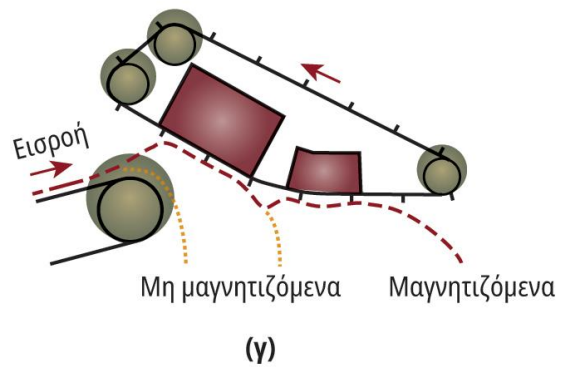
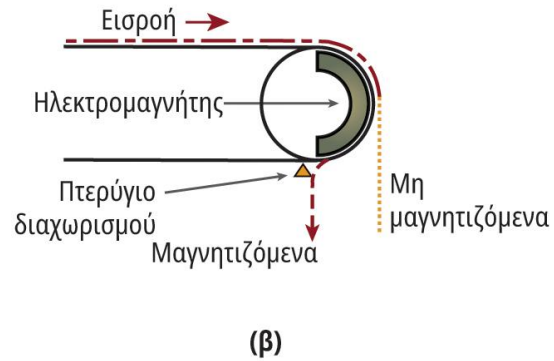
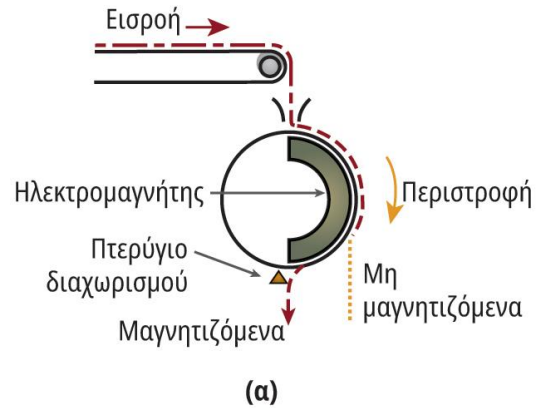
(α)



(β)

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Διαχωρισμός μετάλλων (σιδηρούχων, αλουμίνιο)



Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Σχεδιαστικά στοιχεία χειρωνακτικού διαχωρισμού



Είδος απορρίμματος	Εύρος (t/εργαζόμενο/h)	Τυπική τιμή (t/εργαζόμενο/h)	Απόδοση ανάκτησης (%)	Σχόλια
Σύμμεικτα	Οικιακά, εμπορικά	0,3-3,6	2,3	Χαμηλή απόδοση ανάκτησης σε υψηλούς ρυθμούς
	Εμπορικά	0,4-5,4	2,7	
Διαχωρισμένα στην πηγή				
Εφημερίδα	0,7-4,5		60-95%	
Χαρτόνι	0,7-4,5		60-95%	
Μικτό χαρτί	0,5-3,6	2,3		
Χαρτί/χαρτόνι	0,5-2,7	1,4		Δύο ρεύματα
Μικτά πλαστικά	0,1-0,4	0,2	80-95%	PET, HDPE
Μικτό γυαλί και πλαστικά	0,2-0,5	0,5		Δύο ρεύματα
Μικτό γυαλί	0,4-0,8	0,6	70-95%	
Γυαλί ανά χρώμα	0,2-0,4	0,3	80-95%	Διαφανές, πράσινο, καφέ
Συσκευασίες αλουμινίου	0,045	0,054	80-95%	
Πλαστικά, αλουμίνιο, γυαλί, κονσέρβες (λευκοσίδηρος)	0,1-0,5	0,3		Τέσσερα ρεύματα

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Σχεδιαστικό παράδειγμα χειρωνακτικού διαχωρισμού

Σε ένα ΚΔΑΥ εισέρχονται 500 t/μήνα μικτών ανακυκλώσιμων (πλαστικά, γυαλί, αλουμίνιο, λευκοσίδηρος). Θεωρώντας μια τυπική τιμή συλλογής (pick up time) τα 0,3 t/άτομο/h, πόσοι εργαζόμενοι χρειάζονται στον ιμάντα του ΚΔΑΥ ώστε να γίνει επιτυχής διαχωρισμός. Θεωρήστε ότι οι ημέρες εργασίας το μήνα είναι 22 και οι ώρες εργασίας ανά ημέρα είναι 7. Τα άτομα που θα υπολογιστούν θα είναι για μία 8ωρη βάρδια με μία ώρα διάλειμμα.

Λύση

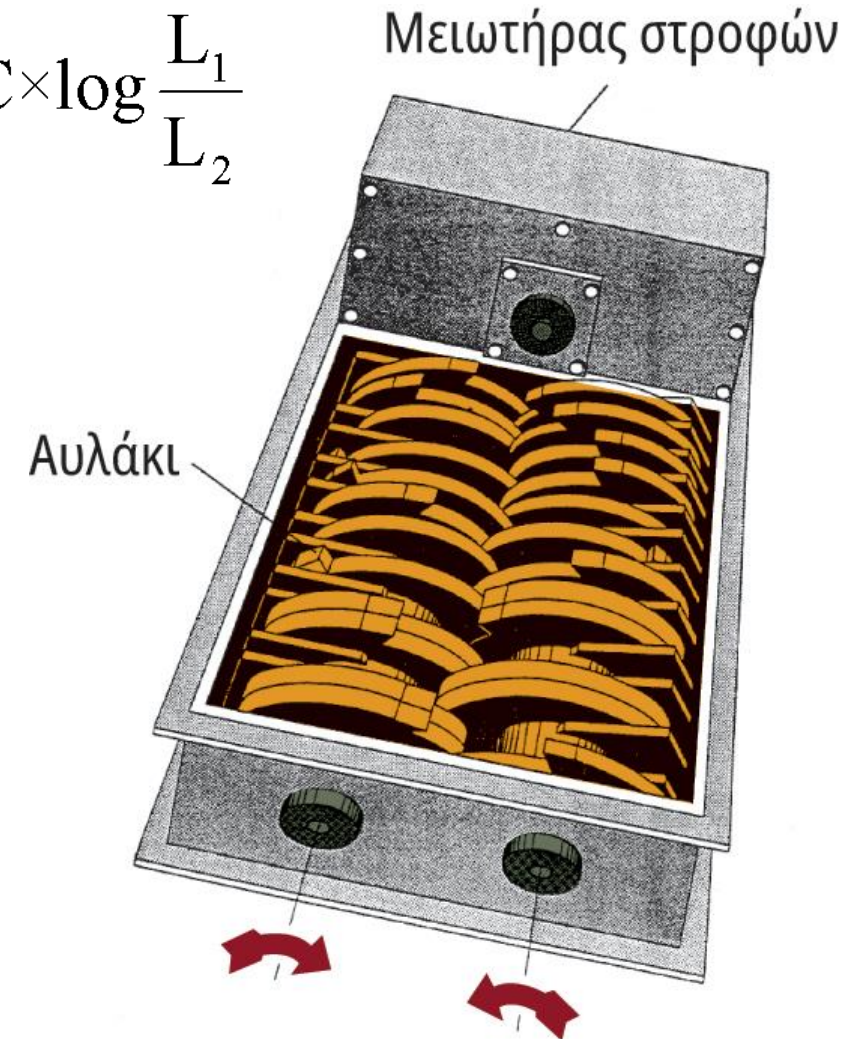
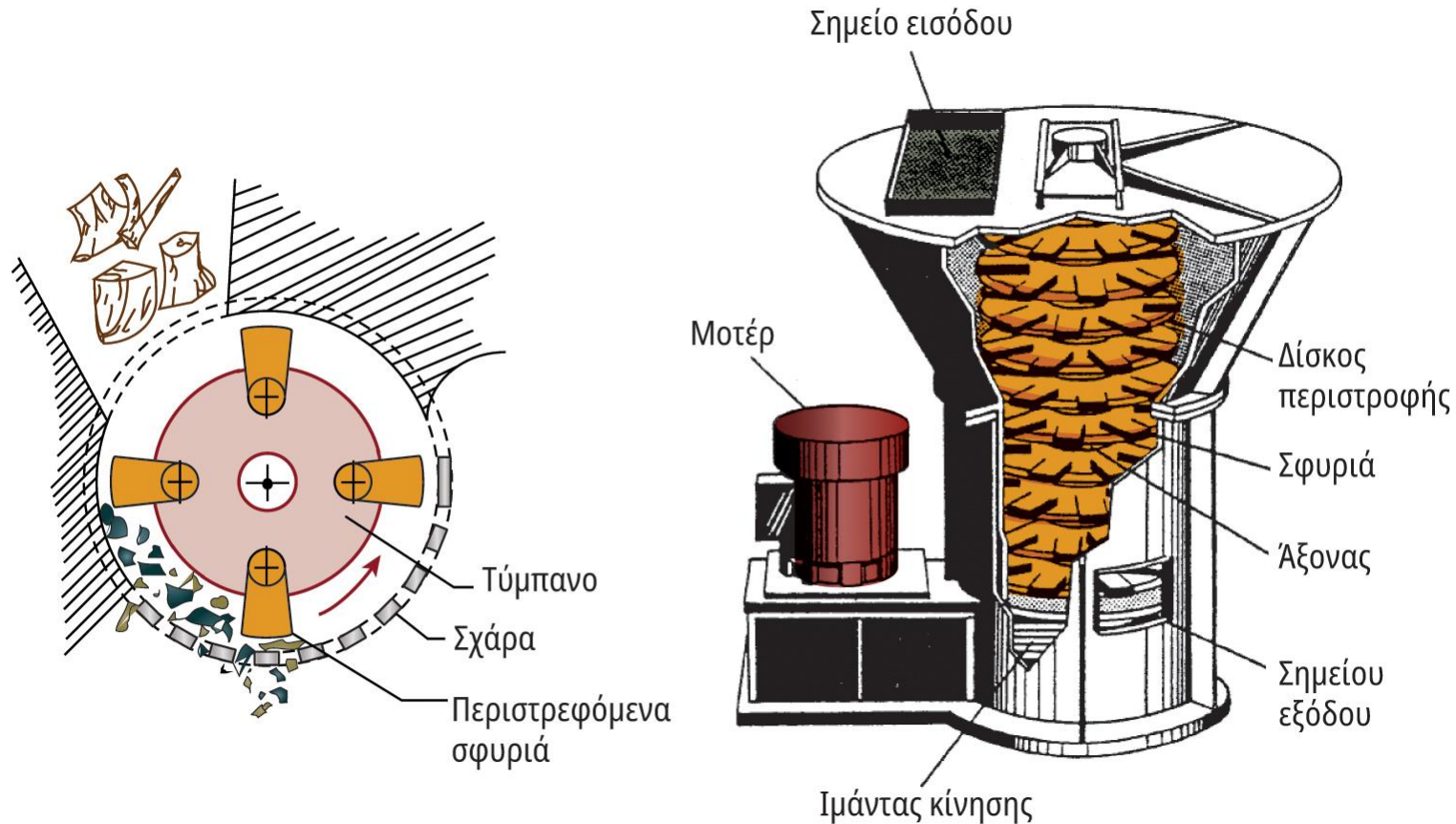
$$500 \text{ t/μήνα} \Rightarrow 500 / (22 \times 7) = 3,24 \text{ t/h}$$

$$\text{Απαιτούμενα άτομα: } 3,24 / 0,3 = 10,8 \rightarrow 11$$

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Τεμαχιστές (Σφυρόμυλοι – Διάτμησης)

$$E = C \times \log \frac{L_1}{L_2}$$



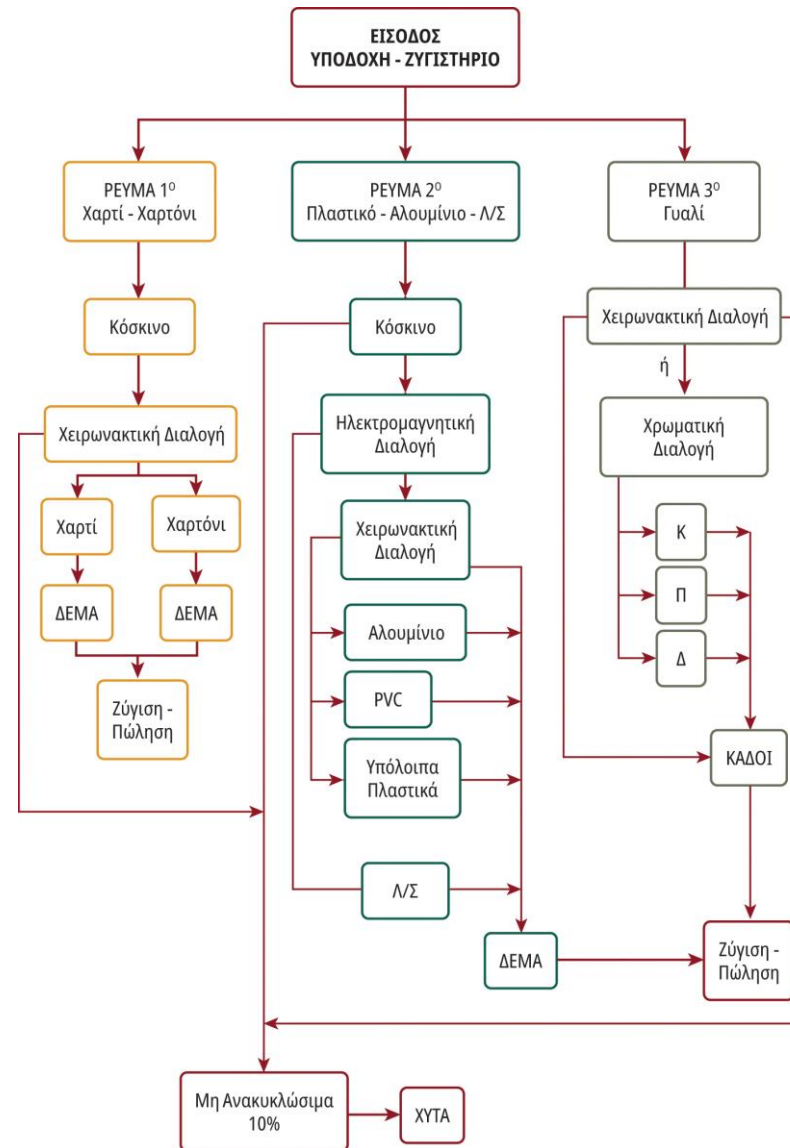
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Δεματοποίηση - Δέματα ανακτώμενων πλαστικών σε ΚΔΑΥ της Β. Ελλάδας



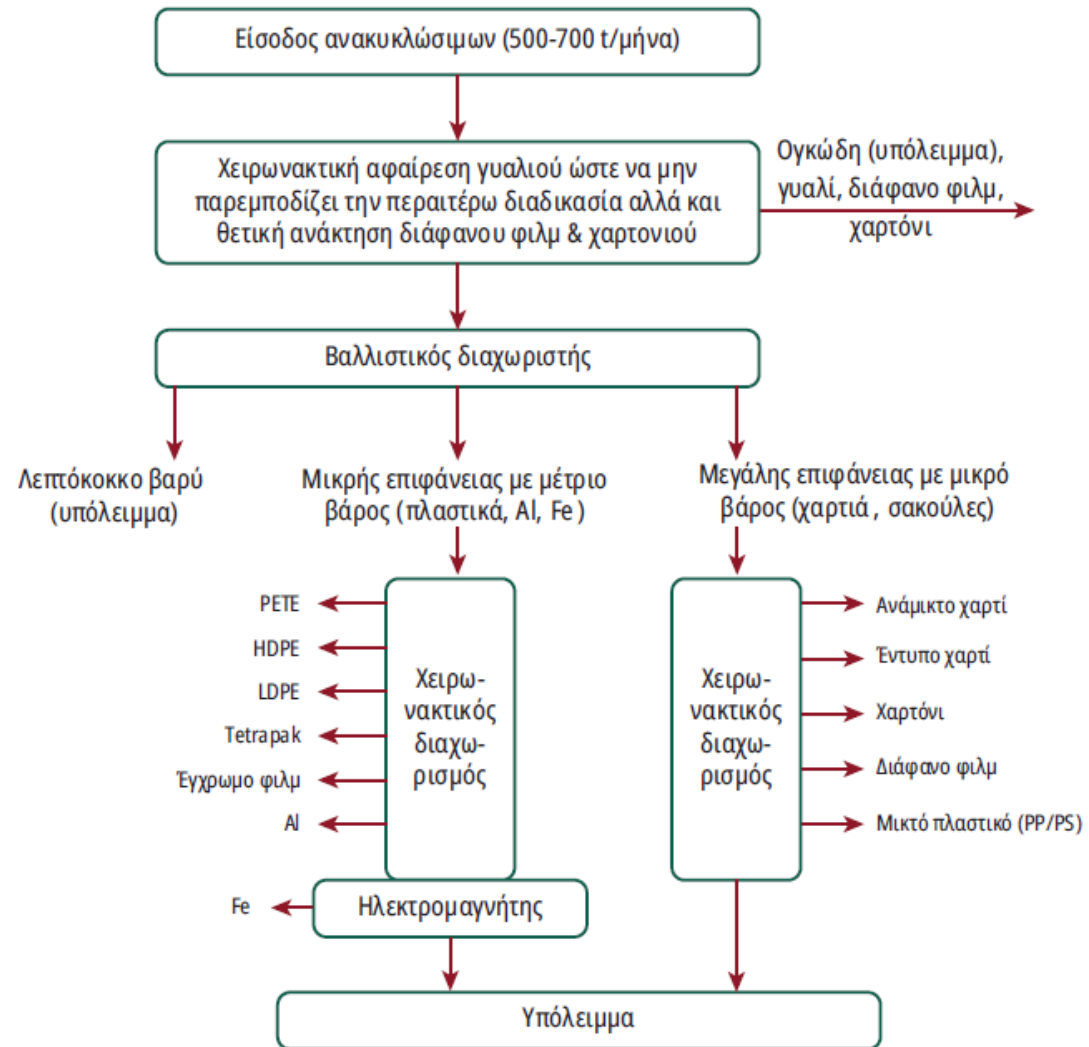
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Διάγραμμα ροής σε
(καθαρό) ΚΔΑΥ που δέχεται
τρία ρεύματα χωριστής
συλλογής



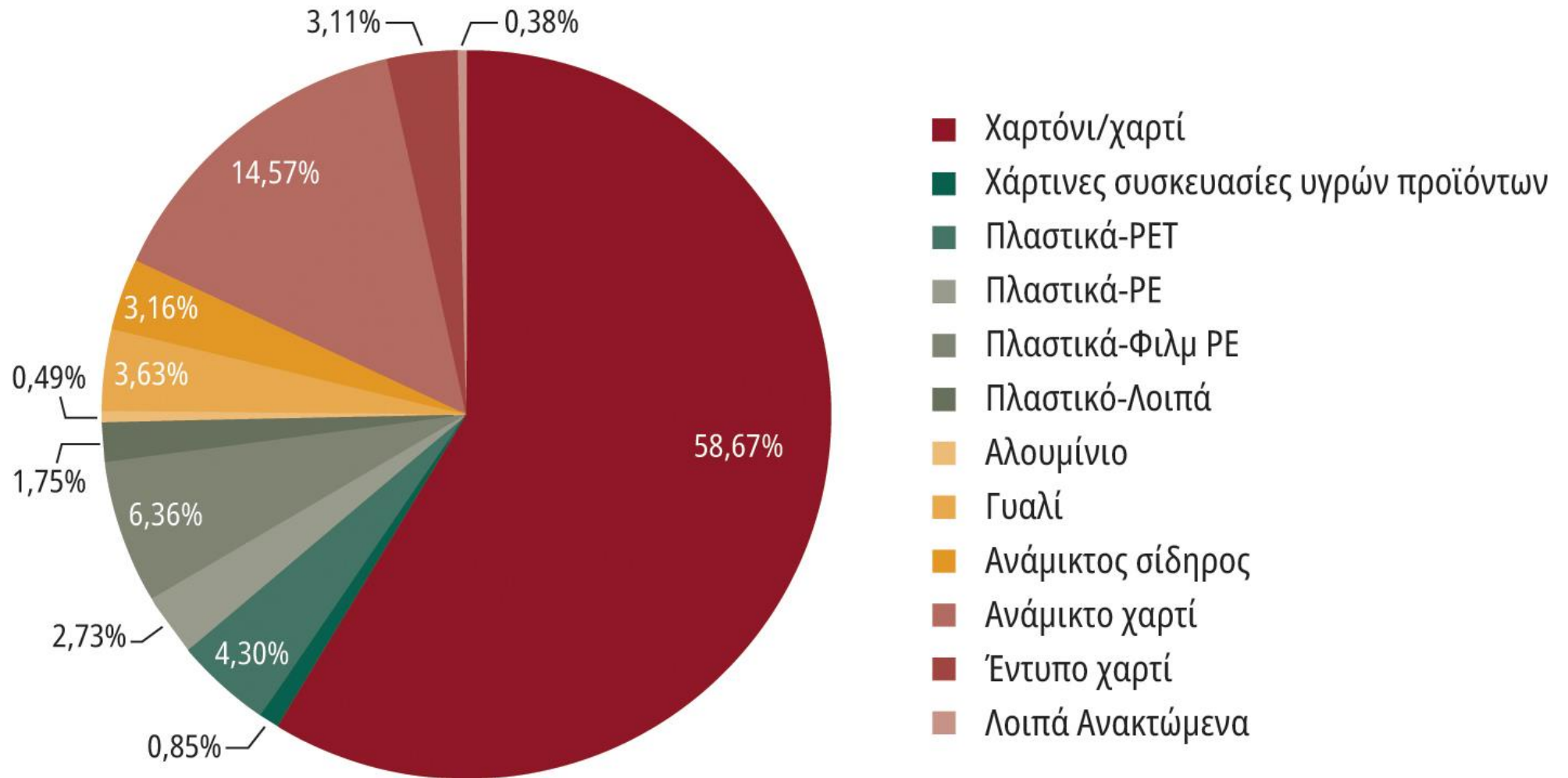
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Διάγραμμα ροής στο (καθαρό)
ΚΔΑΥ Αλεξανδρούπολης
(τυπικό ελληνικό ΚΔΑΥ) που
δέχεται μικτές απορριμματικές
συσκευασίες



Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Σύσταση (% κβ) ανακτώμενων υλικών σε ελληνικά ΚΔΑΥ



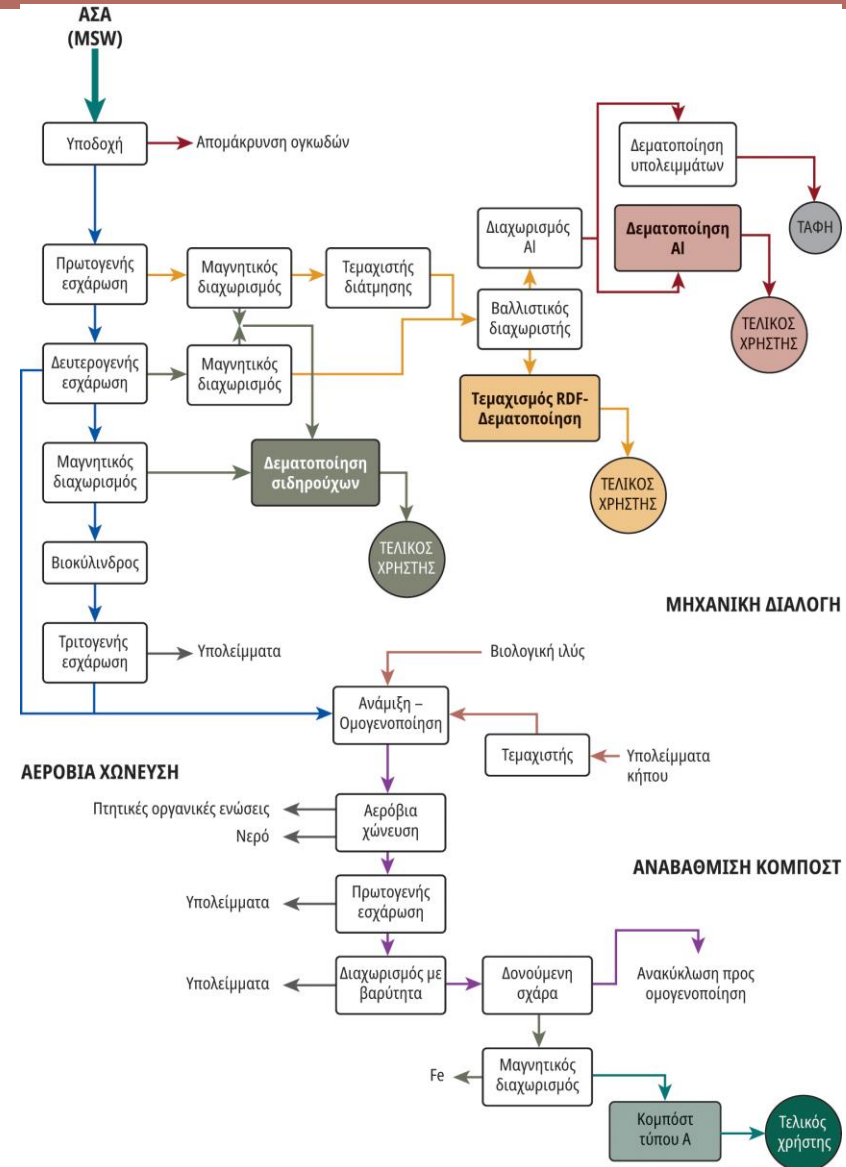
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Συνδυαστικοί στόχοι MBT (ΜΒΕ) εργοστασίων για σύμμεικτα ΑΣΑ

1. Ανάκτηση ξηρών ανακυκλώσιμων μέσω θετικού διαχωρισμού. Τα ξηρά ανακυκλώσιμα είναι συνήθως χαμηλότερης αξίας σε σχέση με αυτά που ανακτώνται σε καθαρά ΚΔΑΥ.
2. Παραγωγή ενέργειας από την αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος των στερεών αποβλήτων (αναερόβια MBT). Στις μονάδες αναερόβιας χώνευσης, το αναερόβιο υπόλειμμα (χώνευμα) συνήθως κομποστοποιείται αερόβια ώστε να παραχθεί ένα βιοσταθεροποιημένο υλικό που μπορεί να ταφεί σε ΧΥΤΑ που δέχονται μόνο υλικό MBT (ή και για άλλες χρήσεις).
3. Παραγωγή (βιο)σταθεροποιημένου υλικού χαμηλής ποιότητας με χρήση αποκλειστικά αερόβιων διεργασιών (αερόβια MBT).
4. Παραγωγή απορριμματογενούς καυσίμου υψηλής θερμογόνου δύναμης (RDF/SRF)

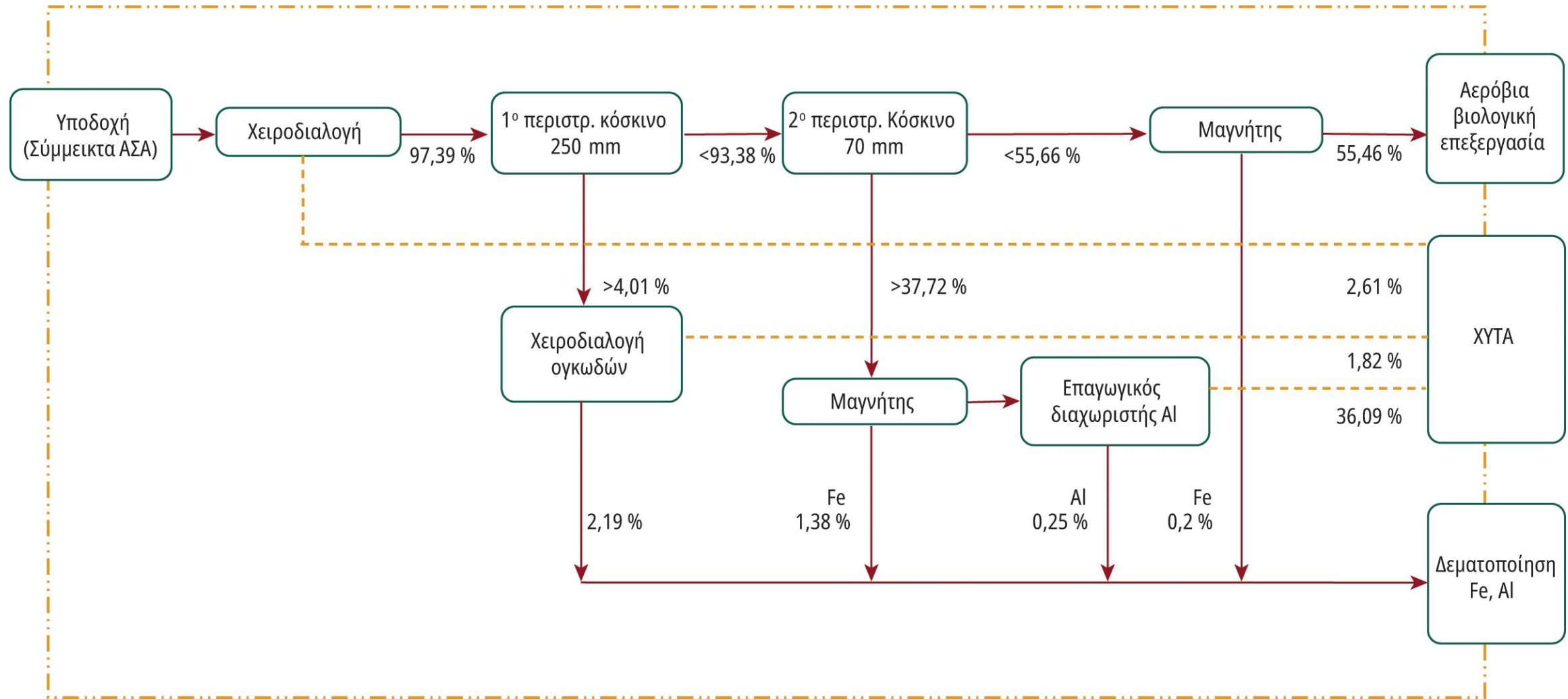
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Διάγραμμα ροής μαζών στην ΕΜΑΚ (αερόβια ΜΕΑ) Λιοσίων



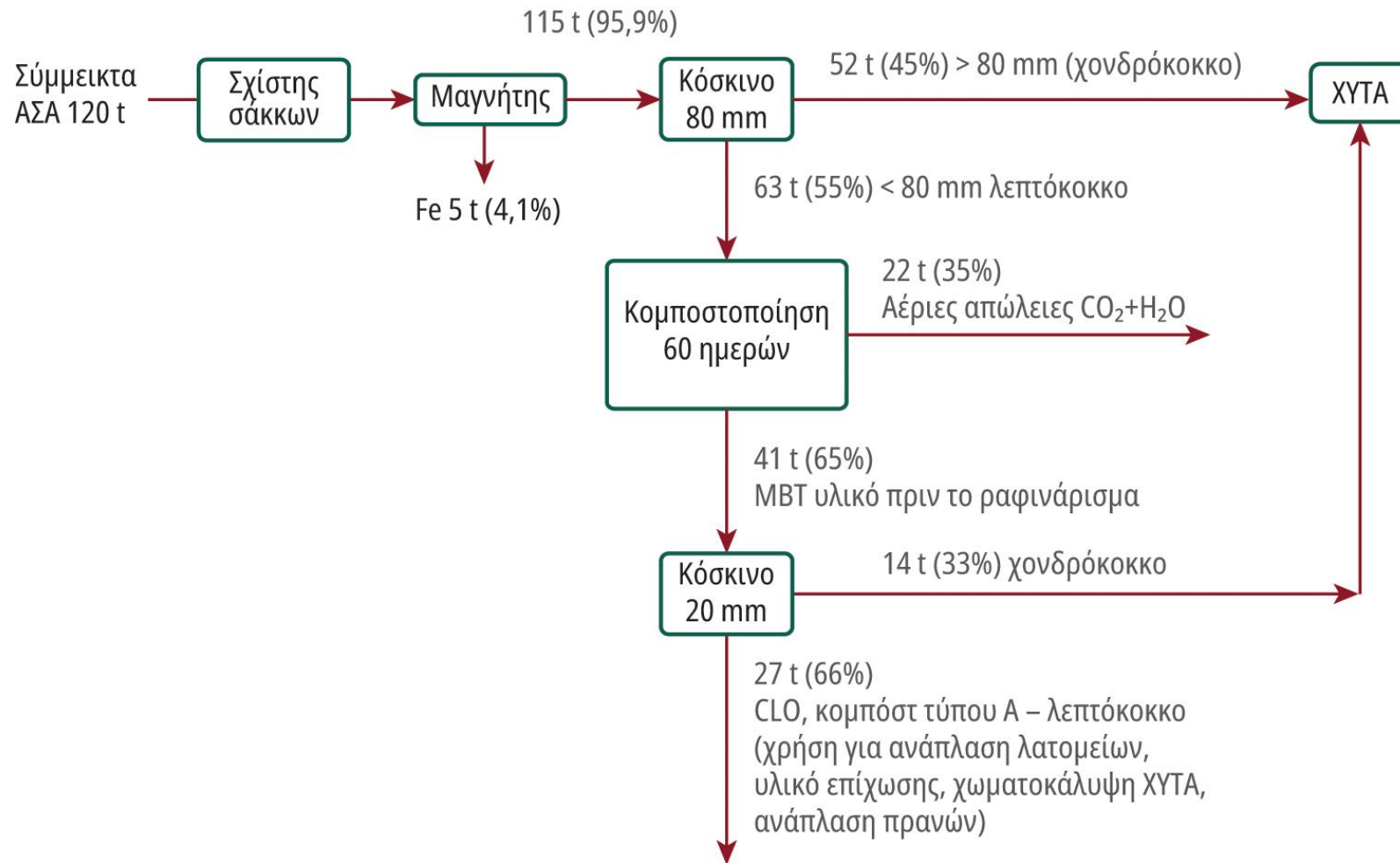
Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Διάγραμμα ροής μαζών στην αερόβια ΜΕΑ σύμμεικτων ΑΣΑ Χανίων



Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Διάγραμμα ροής μαζών στην αερόβια ΜΕΑ σύμμεικτων ΑΣΑ της ΠΕ Δράμας



Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Παράδειγμα ισοζυγίου μάζας σε ΜΕΑ σύμμεικτων ΑΣΑ – Δήμος Δοξάτου Δράμας

Ο Δήμος Δοξάτου παράγει 100 t/w σύμμεικτων ΑΣΑ εβδομαδιαία, που συλλέγονται σε γκρι κάδους, και 7 t/week ανακυκλώσιμων που συλλέγονται χωριστά σε μπλε κάδους και οδηγούνται σε ΚΔΑΥ (με ποσοστό υπολειμμάτων 40% επί της ποσότητας εισόδου). Πριν την έναρξη της ΜΕΑ Δράμας (δες σχήμα 5.17), ο Δήμος Δοξάτου διέθετε τα σύμμεικτα απορρίμματά του στο ΧΥΤΑ Σερρών, ο οποίος χρέωνε ένα τέλος εισόδου ίσο με €28/t (πλέον ΦΠΑ). Από το έτος 2019, ο Δήμος Δοξάτου οδηγεί τα σύμμεικτα απορρίμματα σε ΜΕΑ με αερόβια επεξεργασία που έχει το διάγραμμα ροής που φαίνεται στο σχήμα 5.17. Σημειώστε ότι ο φόρος ταφής (εισφορά κυκλικής οικονομίας) είναι €10/t και χρεώνεται στα απορρίμματα που απευθείας πηγαίνουν ταφή χωρίς ενδιάμεση επεξεργασία. Υπολογίστε:

- Τη συνολική εκτροπή από την ταφή για το Δήμο μετά τη λειτουργία της ΜΕΑ;
- Ποιο είναι το κόστος ταφής και πως αλλάζει αυτό σε σχέση με την πρωτύτηρη κατάσταση;
- Ποιο είναι ο δείκτης χωριστής συλλογής (δείκτης συμμετοχής στην ανακύκλωση) για το Δήμο;
- Ποιο είναι ο δείκτης ανακύκλωσης των μικτών ανακυκλώσιμων για το Δήμο;
- Ποιος θα ήταν ο δείκτης ανακύκλωσης των βιοαπόβλητων, αν υποθέταμε (δεν έχει ξεκινήσει ακόμα) ότι τα βιοαπόβλητα που συλλέγονται με χωριστή συλλογή στο συγκεκριμένο δήμο είναι 20 t/w;
- Να λάβετε υπόψη εδώ ότι τα βιοαπόβλητα που ανακτώνται στη ΜΕΑ από τα σύμμεικτα ΑΣΑ που οδηγούνται εκεί είναι το 41% του εισερχόμενου ρεύματος. Ως βιοαπόβλητα σύμμεικτων ορίζεται η ποσότητα που εισέρχεται στο σύστημα κομποστοποίησης μείον το χονδρόκοκκο υλικό μετά το ραφινάρισμα.

Κεφάλαιο 5 : Μηχανική επεξεργασία

Λύση ισοζυγίου μάζας σε ΜΕΑ σύμμεικτων ΑΣΑ – Δήμος Δοξάτου Δράμας

Εκτροπή από την ταφή πριν τη λειτουργία της ΜΕΑ: $(107 - 102,8)/107 = 3,9\%$

Εκτροπή από την ταφή μετά τη λειτουργία της ΜΕΑ: $(107 - 57,8)/107 = 46\%$

Κόστος πριν ΜΕΑ: $100 \times (34,7 + 10) + 2,8 \times 34,7 = 4.567 \text{ €/w}$

Κόστος μετά τη ΜΕΑ: $57,8 \times 34,7 \text{ €/t} = 2.006 \text{ €/w}$

Μικτές απορριμματικές συσκευασίες (Ξηρά Ανακυκλώσιμα)

$\Delta\chi_{\Sigma\Xi\text{A}} = 7/(107 \times 15\%) = 43,6\%$

$\Delta\text{Ανακ}\Xi\text{A}: (7 \times 60\%)/(107 \times 15\%) = 26,2\%$

Βιοαπόβλητα

$\Delta\chi_{\Sigma\beta\alpha} = 20/(107 \times 50\%) = 37,4\%$

$\Delta\text{Ανακ}\beta\alpha = (20 + 41\% \times 80)/(107 \times 50\%) = 98\%$

Σύνολο ΑΣΑ

$\Delta\chi_{\Sigma\sigma\upsilon\nu} = (7 + 20)/107 = 25,2\%$

$\Delta\text{Ανακ}\text{ΑΣΑ} = (7 \times 60\% + 20 + 41\% \times 80)/107 = 53,3\%$

$\Delta\text{Εκτροπ} = (107 - 7 \times 40\% - 80 \times 55\%)/107 = 56\%$