



# ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

## ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



### Στην βιομηχανία τροφίμων χρειάζονται πληροφορίες για:

- τις απαιτήσεις σε υλικά και πρώτες ύλες
- τον όγκο παραγωγής
- την ανακύκλωση παραπροϊόντων
- την εκτίμηση των αναγκών σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας κοινών ή/και τοξικών αποβλήτων
- τον προσδιορισμό ή έλεγχο προδιαγραφών
- τις ανάγκες σε αποθηκευτικούς χώρους
- τις ενεργειακές ανάγκες
- την κοστολόγηση



## Προσδιορισμός ισοζυγίων μάζας

Κατά τον προσδιορισμό των ισοζυγίων μάζας γίνεται εφαρμογή του νόμου διατήρησης της μάζας.

Σε καθημερινό επίπεδο τα ισοζύγια αφορούν:

- ✓ στον σχεδιασμό νέων επεξεργασιών
- ✓ στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας
- ✓ στον υπολογισμό της απόδοσης
- ✓ στον προσδιορισμό συνθέσεων



## Αρχή διατήρησης της μάζας

- ☀ Η ύλη δεν μπορεί να δημιουργηθεί - από το μηδέν - ούτε να καταστραφεί ολοσχερώς (*Lavoisier*), ειδικότερα:
  - Η μάζα είναι αναλλοίωτο μέγεθος
  - Η μάζα ενός αντικειμένου είναι ίση με το άθροισμα των μαζών των συστατικών του (Κάποιες εξαφάνσεις αφορούν την πυρηνική φυσική)



Με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας, η ροή πρώτων υλών, προϊόντων και παραπροϊόντων σε μια διεργασία, περιγράφεται από την εξίσωση:

*Σύνολο πρώτων υλών = σύνολο προϊόντων, παραπροϊόντων, αποβλήτων + σύνολο συσσωρευμένων υλικών.*

- Αν η συσσώρευση είναι μηδενική τότε η διαδικασία λειτουργεί υπό σταθερή (μόνιμη) κατάσταση (steady state) και ισχύει ότι:  
*εισερχόμενα υλικά = εξερχόμενα υλικά*
- Αν η συσσώρευση δεν είναι μηδενική τότε γίνεται λόγος για επεξεργασία υπό ασταθή κατάσταση (unsteady state).



## Διαδικασία σύνταξης ισοζυγίων

- Ορισμός συστήματος (τι μετράμε?)
- Καθορισμός ορίων συστήματος (από πού έως που το μετράμε? ή για πόσο?)
- Καθορισμός βάσης υπολογισμών (πώς το μετράμε?)



## Ορισμοί

- **Σύστημα:** Όλη η διεργασία ή τμήμα μιας διεργασίας την οποία εξετάζουμε για κάποιο χρονικό διάστημα και η οποία περικλείεται ανάμεσα σε κάποια νοητά όρια (όρια συστήματος). Η επιλογή του συστήματος γίνεται αυθαίρετα ή βάση εμπειρίας.
  - **Ανοικτό Σύστημα:** Ροή- μεταφορά μάζας δια μέσου των άκρων (ή ορίων) του συστήματος
  - **Κλειστό Σύστημα:** Χωρίς ροή-μεταφορά μάζας δια μέσου των ορίων του συστήματος



## Παραδείγματα ανοικτών συστημάτων:

- **Γραμμές Διαλογής και Πλυσίματος:** Φρούτα και λαχανικά που κινούνται σε ανοικτούς διαδρόμους ή ιμάντες μεταφοράς.
- **Ανοικτοί Βραστήρες:** Μαγειρική σε καζάνια χωρίς καπάκι, όπου διαφεύγουν υδρατμοί και θερμότητα.
- **Ξήρανση στον Αέρα:** Παραδοσιακή ξήρανση προϊόντων (π.χ. σταφίδες, βότανα) σε ανοικτούς χώρους.
- **Ψυκτικοί Θάλαμοι με Συνεχή Ροή:** Ανοικτές βιτρίνες ή χώροι αποθήκευσης όπου ο αέρας εισέρχεται και εξέρχεται ελεύθερα.

## Παραδείγματα κλειστών συστημάτων:

- Παστεριωτές (Σωληνωτοί ή Πλακοειδείς): Το γάλα ή ο χυμός κυκλοφορεί μέσα σε σφραγισμένες σωληνώσεις χωρίς επαφή με τον αέρα.
- Αυτόκαυστα (Retorts): Κονσέρβες που θερμαίνονται υπό πίεση σε σφραγισμένους θαλάμους για αποστείρωση.
- Συστήματα CIP (Cleaning-In-Place): Κλειστά κυκλώματα καθαρισμού δεξαμενών και σωληνώσεων που δεν απαιτούν αποσυναρμολόγηση.
- Ζύμωση σε Κλειστές Δεξαμενές: Παραγωγή κρασιού ή μπύρας σε δεξαμενές από ανοξείδωτο χάλυβα όπου ελέγχεται η έξοδος αερίων (π.χ.  $CO_2$ ) χωρίς είσοδο εξωτερικών ρύπων.

## Παραδοχές ισοζυγίων

- Στην ανάλυση ισοζυγίων, η παραδοχή ενός κλειστού συστήματος (ή συχνότερα ενός «απομονωμένου» ελέγχου) δεν γίνεται γιατί τα συστήματα είναι όντως κλειστά στην πραγματικότητα, αλλά ως μια στρατηγική απλούστευσης για τον υπολογισμό.
- Οι βασικοί λόγοι είναι οι εξής:
- **Νόμος Διατήρησης:** Η βασική αρχή «Είσοδος = Έξοδος + Συσσωρευση» απαιτεί ένα σαφώς ορισμένο όριο συστήματος. Θεωρώντας το σύστημα «κλειστό» ως προς τις απώλειες, μπορούμε να εφαρμόσουμε τον νόμο της διατήρησης της μάζας και της ενέργειας χωρίς να έχουμε «διαρροές» προς το άγνωστο περιβάλλον.
- **Μαθηματική Ευκολία:** Αν δεν θεωρούσαμε το σύστημα κλειστό (μονωμένο), θα έπρεπε να υπολογίσουμε τις τυχαίες απώλειες (π.χ. θερμότητα που χάνεται από τα τοιχώματα ενός σωλήνα ή εξάτμιση υγρασίας στον αέρα). Αυτές οι μεταβλητές είναι συχνά απρόβλεπτες και εξαιρετικά δύσκολο να μετρηθούν με ακρίβεια.
- **Ιδανικό Μοντέλο (Benchmark):** Η παραδοχή αυτή δημιουργεί ένα ιδανικό σενάριο. Στη συνέχεια, η απόκλιση της πραγματικής μέτρησης από το ιδανικό ισοζύγιο μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την αποδοτικότητα (efficiency) της διεργασίας.
- **Σταθερή Κατάσταση (Steady State):** Στις περισσότερες βιομηχανικές ροές, υποθέτουμε ότι η μάζα που μπαίνει ισούται με αυτή που βγαίνει. Αυτό είναι εφικτό μόνο αν ορίσουμε ένα «κλειστό» νοητό πλαίσιο ελέγχου γύρω από τη μηχανή.
- Στην πράξη: Οι μηχανικοί γνωρίζουν ότι υπάρχει απώλεια (π.χ. ένα 5-10% της ενέργειας πάντα «δραπετεύει»), αλλά ξεκινώντας από το κλειστό σύστημα, θέτουν τη βάση για τον τελικό σχεδιασμό.

## 1<sup>η</sup> Προϋπόθεση για την σύνταξη και επίλυση ισοζυγίων μάζας

- Η επιλογή του συστήματος στο οποίο αναφέρεται το ισοζύγιο
  - Ποιο τμήμα από το σύνολο των τμημάτων που αποτελούν μια «γραμμή παραγωγής» θα αναλυθεί κάθε φορά.
  - Τα όρια επιλέγονται ώστε να περιλαμβάνουν τις διαδρομές ενός υλικού που παρουσιάζει ενδιαφέρον και μας δίνει αρκετά δεδομένα για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου διαγράμματος ροής.

## 2<sup>η</sup> προϋπόθεση για την σύνταξη και επίλυση ισοζυγίων μάζας

- Η επιλογή της βάσης των υπολογισμών
  - Σε ποιες ποσότητες θα αναφέρεται (ή τι μονάδες θα αφορά) η εκτίμηση του ισοζυγίου.
  - Συχνά σαν βάση χρησιμοποιείται ένα **ορισμένο βάρος** ενός υλικού που εισέρχεται στο σύστημα (εάν είναι δυνατόν από μία διαδρομή) ή **κάποια χρονική περίοδος λειτουργίας** της γραμμής επεξεργασίας.

## Για την επίλυση ενός ισοζυγίου:

- ✦ Απαιτείται η δημιουργία συστήματος εξισώσεων
  - μία για κάθε άγνωστη ποσότητα που πρέπει να προσδιορισθεί και
  - μία επιπλέον εξίσωση για το σύνολο των υλικών

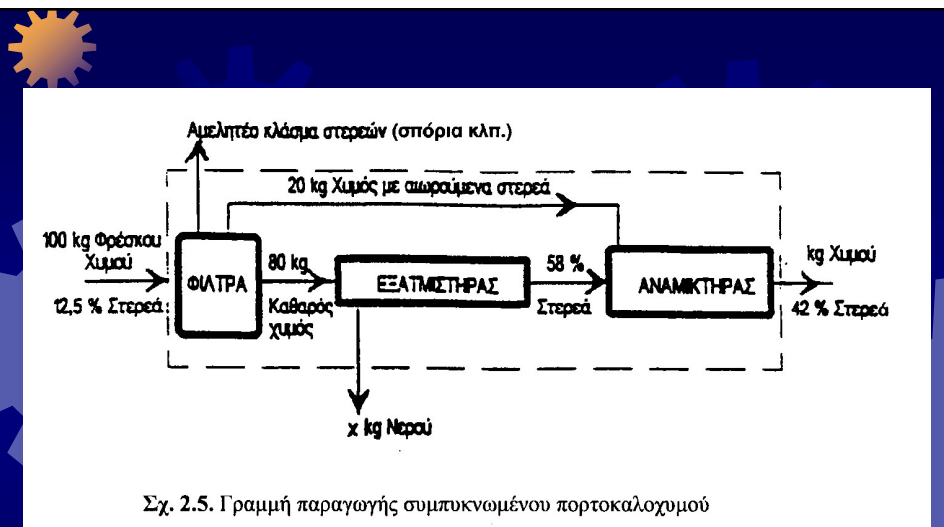
## Παράδειγμα 1

- ✦ Σε ένα συμπυκνωτήρα, χυμός με 8% στερεά συμπυκνώνεται για παραγωγή χυμού με 22% στερεά. Πόσο νερό πρέπει να εξατμισθεί για να πραγματοποιηθεί η συμπύκνωση του;



## Παράδειγμα 3

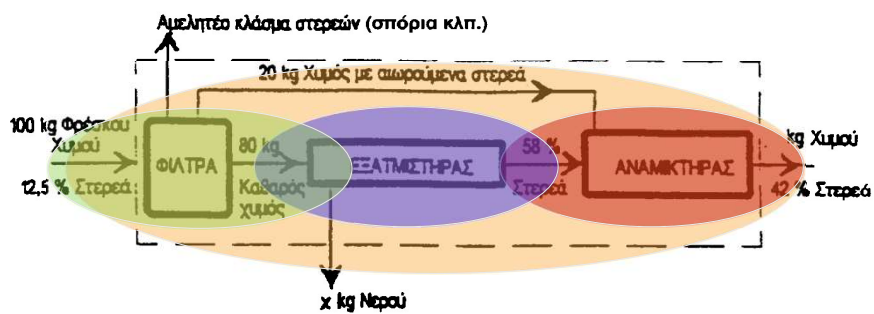
- Κατά την συμπύκνωση πορτοκαλοχυμού με εξάτμιση, παρατηρείται απώλεια αρωματικών συστατικών με αποτέλεσμα να παράγεται χαμηλής ποιότητας συμπυκνωμένος χυμός (χωρίς άρωμα). Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η συμπύκνωση του χυμού μέχρι περιεκτικότητας 58% σε στερεά σε εξατμιστήρες κενού και η ανάμειξη του μείγματος με φρέσκο, ασυμπύκνωτο χυμό, για παραγωγή μείγματος με 42% στερεά. Αναλυτικότερα, ο φρέσκος χυμός με 12,5% στερεά περνά από ειδικά φίλτρα όπου χωρίζεται σε στραγγισμένο χυμό, σε χυμό που περιέχει διαλυτά και αιωρούμενα στερεά (πούλπα - pulp) και σε άλλα κλάσματα (σπόρια, φλούδες). Από τον φρέσκο χυμό που τροφοδοτεί τα φίλτρα, 80% κατά βάρος περνά στους εξατμιστήρες κενού. Το υπόλοιπο 20% περίπου του χυμού που δεν περνά στους εξατμιστήρες (χυμός με πούλπα) χρησιμοποιείται για διάλυση του συμπυκνωμένου χυμού (58% στερεά) μέχρι επίτευξης της τελικής επιθυμητής περιεκτικότητας σε στερεά (42% στερεά). Να υπολογισθούν: α) το βάρος του εξατμιζόμενου νερού ανά 100Kg φρέσκου χυμού που τροφοδοτείται στο σύστημα, β) η περιεκτικότητα σε στερεά κάθε ρεύματος που βγαίνει από τα φίλτρα, γ) η αναλογία βάρους συμπυκνωμένου προς ασυμπύκνωτο χυμό στο τελικό προϊόν.



**Tip:** Για όλα τα παραπάνω εισερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα θα πρέπει να υπολογιστούν τόσο η μάζα (kg), όσο και η περιεκτικότητα σε στερεά (%).

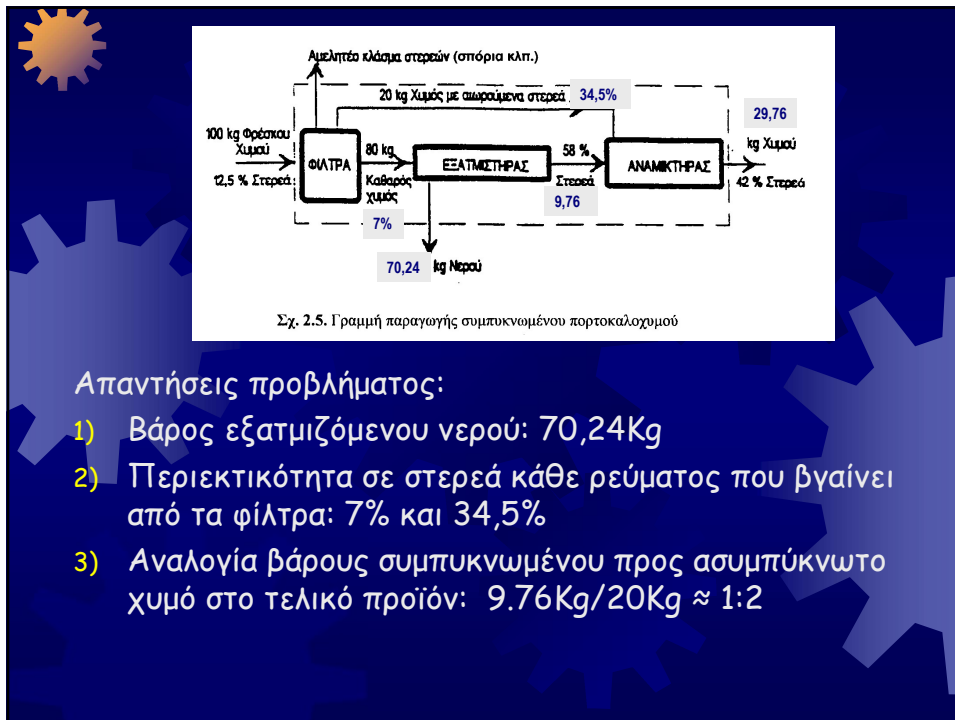
## Απάντηση

- ☀ Το πρόβλημα το αντιμετωπίζουμε σαν ένα «άθροισμα προβλημάτων» ανάλογων του προβλήματος που λύσαμε αρχικά.
- ☀ Δηλαδή, θα βρούμε τόσο τις ποσότητες όσο και τις περιεκτικότητες κάθε κλάσματος του χυμού στα διάφορα σημεία επεξεργασίας του από την είσοδο έως την έξοδο.



Σχ. 2.5. Γραμμή παραγωγής συμπυκνωμένου πορτοκαλοχυμού

Είναι ίδια η περίπτωση του απλού εξατμιστήρα του προηγούμενου παραδείγματος **επί 4**.



Απαντήσεις προβλήματος:

- 1) Βάρος εξατμιζόμενου νερού: 70,24Kg
- 2) Περιεκτικότητα σε στερεά κάθε ρεύματος που βγαίνει από τα φίλτρα: 7% και 34,5%
- 3) Αναλογία βάρους συμπυκνωμένου προς ασυμπύκνωτο χυμό στο τελικό προϊόν:  $9.76\text{Kg}/20\text{Kg} \approx 1:2$

## Προσδιορισμός ισοζυγίων ενέργειας

- ☀️ Προσδιορισμός ισοζυγίων ενέργειας είναι η εφαρμογή του νόμου διατήρησης της ενέργειας στην επίλυση προβλημάτων που αφορούν τον προσδιορισμό των διαφόρων ροών ενέργειας γύρω από μια γραμμή επεξεργασίας.
- ☀️ Εδώ έχουμε εφαρμογή του νόμου διατήρησης της ενέργειας:  
**Συνολικά εισερχόμενη ενέργεια = Συνολικά εξερχόμενη ενέργεια**

## Χαρακτηριστικά ενέργειας

- Εσωτερική ενέργεια (E) δηλ. μοριακή, ατομική, χημική, θερμική
  - Εξωτερική ενέργεια (E')
- Ενέργεια θέσης - δυναμική ( $E'_p$ ) =  $m \cdot g \cdot h$
  - Ενέργεια κίνησης ( $E'_k$ ) =  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

Όπου  $m$  = μάζα (Kg),  $g$  = επιτάχυνση βαρύτητας ( $m/s^2$ ),  $h$  = η κατακόρυφη απόσταση και  $v$  = ταχύτητα (m/s)

## Μεταβολές ενέργειας

- Στην βιομηχανία τροφίμων δεν έχουν σημασία οι απόλυτες τιμές της ενέργειας αλλά οι μεταβολές της ανάμεσα σε διάφορες καταστάσεις όπως:

Μεταβολές κινητικής ενέργειας  $\Delta E'_p = mgh_2 - mgh_1 = mg(h_2 - h_1) = mg\Delta h$

Μεταβολές δυναμικής ενέργειας  $\Delta E'_k = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2)$

Οπότε, η μεταβολή της συνολικής ενέργειας είναι:

$$\Delta E_T = \Delta E + \Delta E' = \Delta E + \Delta E'_p + \Delta E'_k$$

## Εκτίμηση μεταβολών ενέργειας

- Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής η μεταβολή της ολικής ενέργειας ενός κλειστού συστήματος ισούται με την θερμική ενέργεια που προστίθεται στο σύστημα μείον το έργο που εκτελείται από το σύστημα ( $\Delta E_T = Q - W$ ) και με την χρήση της ενθαλπίας :

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(PV) = Q + W_f + \int V dP$$

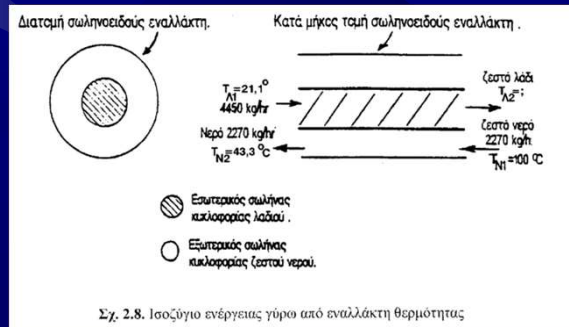
(όπου  $W_f$  το έργο μείον τις τριβές,  $V$  και  $P$  ο όγκος και η πίεση του συστήματος)

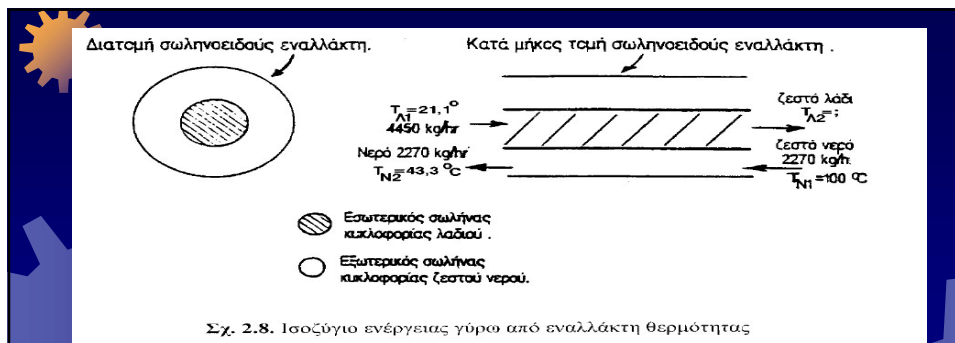
- Υπό σταθερή πίεση και με μηδενικές τριβές η παραπάνω εξίσωση γίνεται :  $\Delta H = Q$

(άρα όλα ανάγονται στην εκτίμηση της μεταβολής της ποσότητας της θερμότητας, τουλάχιστον στις θερμικές διεργασίες).

## Παράδειγμα 4

- Σε μια γραμμή απόσπησης λαδιών, το ακατέργαστο λάδι προθερμαίνεται σε ένα σωληνοειδή εναλλάκτη με αντιρροή. Το θερμαντικό είναι συμπυκνώματα ατμού με παροχή 2270 kg/h. Το ακατέργαστο λάδι μπαίνει στον εναλλάκτη με θερμοκρασία 21,1°C και παροχή 4450 kg/h. Αν η θερμοκρασία εισόδου του ζεστού νερού είναι 100°C και η θερμοκρασία εξόδου του είναι 43,3°C ποια θα είναι η θερμοκρασία εξόδου του λαδιού από τον εναλλάκτη;
- Ειδική θερμότητα λαδιού : 0,5 kcal/kg°C και νερού: 1 kcal/kg°C





- ✦ Εδώ ισχύει ότι: η εισερχόμενη ενθαλπία θα είναι ίση με την εξερχόμενη ενθαλπία δηλ. η **Ενθαλπία του εισερχόμενου λαδιού + ενθαλπία εισερχόμενου νερού = ενθαλπία του εξερχόμενου λαδιού + εξερχόμενου νερού**
- ✦ Σαν βάση υπολογισμών λαμβάνουμε τους  $21,1^{\circ}\text{C}$  που είναι η μικρότερη τιμή στο σύστημα!

## ✦ Μικτά ισοζύγια μάζας - ενέργειας

- ✦ Στην πράξη συχνά η επίλυση ενός ισοζυγίου ενέργειας προαπαιτεί την γνώση στοιχείων από την επίλυση ισοζυγίων μάζας.
- ✦ Στην βιομηχανία τροφίμων οι ανάγκες επίλυσης ισοζυγίων αφορούν κυρίως τα μικτά ισοζύγια.
- ✦ Τις επιλύσεις αναλαμβάνουν πολύπλοκα λογισμικά τα οποία συνήθως και αυτοτροφοδοούνται με δεδομένα από αισθητήρες και μετρητές κατάλληλα κατανομημένους στις γραμμές επεξεργασίας.



## Άσκηση

- Οινοποιείο διαθέτει τρεις ποιότητες κρασιών, που οι περιεκτικότητές τους σε αλκοόλη και ζάχαρα δίνονται στον παρακάτω πίνακα, και θέλει να παράγει ένα τσέρυ με 15 % αλκοόλη και 2% ζάχαρα. Ζητείται η αναλογία τροφοδοσίας των 3 κρασιών προς τον αναμικτήρα για την παραγωγή του προϊόντος.

Τύπος	% αλκοόλη	%ζάχαρα
Κρασί Α	14,6	0,2
Κρασί Β	16,7	1
Κρασί Γ	17	12