

Σ. Κιρκαγασλής:

Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών: Ένας πραγματικός σύμμαχος εξοικονόμησης κόστους παραγωγής και ενίσχυσης απόδοσης διεργασιών.



Ένα από τα βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά που παρακολουθεί η βιομηχανία τροφίμων είναι το καθαρό βάρος των προϊόντων που παράγει. Ο λόγος δεν έχει να κάνει μόνο με την ικανοποίηση των πελατών, αλλά πρωτίστως με την ικανοποίηση της κείμενης νομοθεσίας, όπως αυτή ορίζεται από την Κοινοτική Οδηγία 76/211/ΕΟΚ, αλλά και από την Αγορανομική Διάταξη 7/2009 για ορισμένες κατηγορίες προϊόντων. Τα ανωτέρω νομοθετικά κείμενα ορίζουν επιτρεπόμενες αποκλίσεις από το καθαρό βάρος των παραγόμενων προϊόντων, αλλά και πλάνα δειγματοληψίας με στόχο την προστασία του καταναλωτή από ελλιποβαρή προϊόντα. Οι ανωτέρω νομοθετικές ρυθμίσεις αποτελούν, φυσικά, αντικείμενο ελέγχου των αρμόδιων κρατικών αρχών και επισύρουν χρηματικές ποινές στη βιομηχανία τροφίμων σε περίπτωση μη συμμόρφωσης.

«Έχω ελεγκτές βάρους πάνω στις γραμμές παραγωγής μου, είμαι απόλυτα καλυμμένος»: Είναι μια δήλωση που κάνουν οι περισσότεροι Υπεύθυνοι Ποιοτικού Ελέγχου, αλλά μην ξεχνάμε ότι τα όρια απόρριψης σε έναν ελεγκτή βάρους μπορεί, αρχικά, να τα δίνουμε εμείς αλλά είναι πολλές οι φορές που οι «έξυπνοι» ελεγκτές βάρους αναπροσαρμόζουν τα όρια μόνοι τους με βάση τα στατιστικά δεδομένα που συλλέγουν. Από την άλλη, υπάρχουν και ερωτήματα τύπου: «Θέλω να εξοικονομήσω χρήματα από πρώτες ύλες: θέλω να γεμίζω τα σακουλάκια μου με όσο προϊόν χρειάζεται και όχι παραπάνω». Επομένως, **σε έναν έλεγχο βάρους όσο σημαντική είναι η προς τα κάτω απόκλιση, άλλο τόσο σημαντική είναι και η προς τα πάνω απόκλιση**, ιδιαίτερα σε μια εποχή κρίσης και εξοικονόμησης κόστους.

Βασικό αξίωμα της παραγωγικής δραστηριότητας είναι ότι δύο παραγόμενα αντικείμενα από την ίδια παραγωγική διαδικασία δεν είναι ποτέ όμοια. Στην πραγματικότητα η έννοια της διακύμανσης είναι θεμελιώδης στον φυσικό κόσμο, αφού ποτέ δύο αντικείμενα δεν είναι όμοια! Η διακύμανση μπορεί να είναι οφθαλμοφανής όπως είναι το ύψος των ανθρώπων ή όχι, όπως είναι η διάμετρος των καπακιών που προορίζονται για ένα μπουκάλι. Είναι όμως ουσιαστικό να μπορούμε να ελέγξουμε τη διακύμανση μιας παραγωγικής δραστηριότητας, αλλά το πιο βασικό είναι να μπορέσουμε να τη μετρήσουμε και να την παρακολουθούμε. Εδώ μπαίνει η έννοια του **Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών**, ο οποίος βρήκε ευρεία εφαρμογή στη Motorola και στην οποία αναπτύχθηκε η μεθοδολογία των 6σ (Six Sigma Methodology) το 1981 [1].

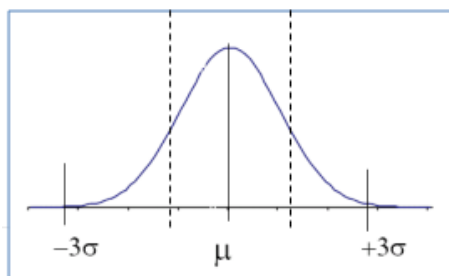
Ας θυμηθούμε από τη Στατιστική, ότι η τυχαιότητα στη φύση εκφράζεται μαθηματικά με τη Συνάρτηση Πιθανότητας Πυκνότητας (Probability Density Function – PDF) (κατανομή Gauss):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Xi-\mu)^2}{2\sigma^2}} \text{ όπου,}$$

Xi, είναι η τιμή της i παρατήρησης ενός πληθυσμού

μ, είναι ο μέσος του πληθυσμού και

σ, είναι η τιμή της διακύμανσης των παρατηρήσεων του πληθυσμού



Η συνάρτηση αυτή απεικονίζεται από τη γνωστή «καμπάνα» του παρακάτω διαγράμματος, ενώ λέμε ότι το εν λόγω τυχαίο φαινόμενο ακολουθεί την «κανονική κατανομή»:

Με την εφαρμογή του **Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος (Central Limit Theorem)** όλες οι κανονικές κατανομές μπορούν να προσεγγιστούν ικανοποιητικά από την *Τυποποιημένη Κανονική Κατανομή* στην οποία μ=0 και σ=1, εφαρμόζοντας την εξής σχέση μετατροπής:

$$z = \frac{Xi - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

οπότε η παραπάνω συνάρτηση γίνεται:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

Ολόκληρη η περιοχή κάτω από την καμπύλη ισούται με τη μονάδα:

$$P(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1 \text{ (δηλαδή το 100 \% των παρατηρήσεων)}$$

Άρα το **ολοκλήρωμα της $f(x)$ εκφράζει την πιθανότητα που έχει μία παρατήρηση να βρεθεί ανάμεσα ανάμεσα στο $-\infty$ και στο $+\infty$** , ή αλλιώς το διάστημα $[X, X+\Delta X]$.

Για την εφαρμογή του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, απαιτείται η εφαρμογή της παρακάτω ακολουθίας βημάτων γνωστής και ως **DMAIC [2]**:

- **Define.** Προσδιορίζεται η παράμετρος εκείνη που θεωρείται κρίσιμη σε σχέση με την ικανοποίηση του πελάτη, τη συμμόρφωση προς θεσμικά πλαίσια και την ικανοποίηση των επιχειρηματικών στόχων.
- **Measure.** Μέτρηση της βασικής παραμέτρου με τη συλλογή δεδομένων.
- **Analyze.** Ανάλυση δεδομένων της παραμέτρου και προσδιορισμός σχέσεων αιτίου – αποτελέσματος (cause-effect).
- **Improve.** Εφαρμογή μεθόδων βελτίωσης της παραμέτρου. Σημαντική, εδώ είναι και η εφαρμογή DoE – Design of Experiments.
- **Control.** Επίτευξη ελέγχου της παραγωγικής διεργασίας και εξασφάλιση της βέλτιστης Ικανότητας Διεργασίας (optimum process capability).

Ας δούμε τα ανωτέρω βήματα, ένα προς ένα για την περίπτωση του καθαρού βάρους τελικού προϊόντος:

Define. Μία κρίσιμη παράμετρος η οποία έχει νομοθετικό περιορισμό, αλλά και επίπτωση στον επιχειρηματικό στόχο «περιορισμός κόστους υλικών» είναι το **καθαρό βάρος τεμαχίου**. Η σχετική νομοθεσία ορίζει προδιαγραφές βάρους προς το ελάχιστο ανεκτό, ήτοι ως προς το ελλιποβαρές της συσκευασίας. Το όριο ανοχής είναι κλιμακωτό σε σχέση με την ονομαστική καθαρή ποσότητα του προϊόντος που αναγράφεται επί της συσκευασίας, σύμφωνα με την Οδ. 76/211/EOK και που φαίνεται στον κάτωθι πίνακα:

Ονομαστική ποσότητα Qn σε γραμμάρια ή σε χλυστόλιτρα	Μέγιστα ανεκτά σφάλματα επί ελαττων	
	% της Qn	σε g ή ml
5 έως 50	9	—
50 έως 100	—	4,5
100 έως 200	4,5	—
200 έως 300	—	9
300 έως 500	3	—
500 έως 1 000	—	15
1 000 έως 10 000	1,5	—

Επομένως, ορίζεται ένα κατώτατο όριο προδιαγραφής του βάρους, δηλαδή το **Lower Specification Limit (LSL)**, ήτοι:

$$\text{Lower Specification Limit (LSL)} = Qn - y*Qn/100$$

Ωστόσο, βασικός επιχειρηματικός στόχος της εταιρείας είναι η κερδοφορία. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχει και ένα άνω όριο στην ποσότητα υλικού που δίνει η βιομηχανία στον τελικό καταναλωτή, δηλαδή ένα **Upper Specification Limit (USL)**. Αυτό θα μπορούσε να είναι το ακριβώς αντίστροφο από αυτό που ορίστηκε ανωτέρω ως LSL και, επομένως, ίσο με:

$$\text{Upper Specification Limit (USL)} = Qn + y*Qn/100$$

Εννοείται ότι είναι στη διακριτική ευχέρεια της κάθε βιομηχανίας να ορίσει εκείνη το USL που επιθυμεί.

Measure. Η μέτρηση δεδομένων βάρους απαιτεί τη δειγματοληψία και έτσι τη συλλογή αριθμητικών δεδομένων. Αφενός όμως, η μέθοδος δειγματοληψίας πρέπει να σχετιστεί με το είδος της διακύμανσης που θέλουμε να καταδείξουμε, αφετέρου πρέπει ο αριθμός των δειγμάτων να είναι αντιπροσωπευτικός του πληθυσμού ώστε να μπορέσουμε με τη βοήθεια των μεθόδων της στατιστικής επαγωγής να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για τον πληθυσμό. Αρχικά, λοιπόν, θα πρέπει να ορίσουμε τι θέλουμε να διαπιστώσουμε:

- Διακύμανση του καθαρού βάρους τεμαχίου εντός μιας βάρδιας; Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται δείγματα σε χρονικό εύρος μιας βάρδιας.
- Διακύμανση του καθαρού βάρους τεμαχίου μεταξύ των βαρδιών; Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται δείγματα σε χρονικά διαστήματα εντός διαφορετικών βαρδιών.

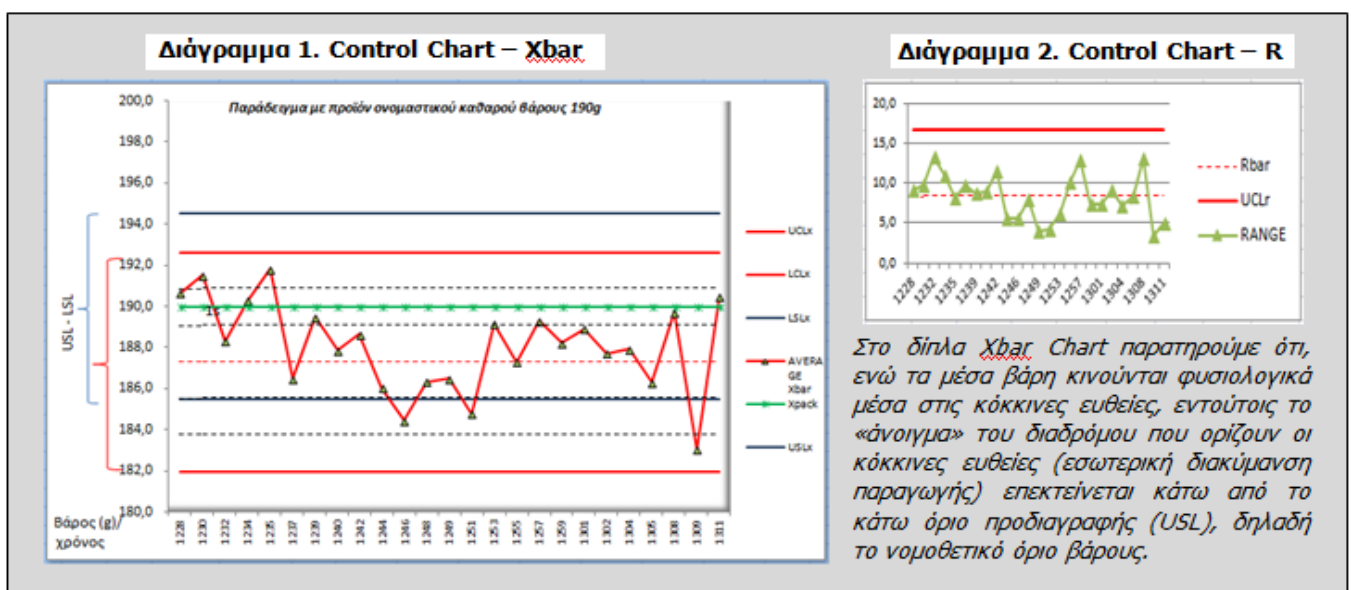
Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των δειγμάτων που θα ληφθούν προσδιορίζεται με βάση την παραγωγικότητα σε κάθε μία από τις ανωτέρω περιπτώσεις, π.χ. τον αριθμό των παραγόμενων τεμαχίων μέσα σε μια βάρδια. Ένα πρότυπο αναφοράς για το μέγεθος δείγματος είναι το ANSI / ASQ Z1.9-1993 – Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Nonconforming [3]. Σε αυτό το πρότυπο ορίζεται, για παράδειγμα, ότι για παραγωγή 10,000 έως 35,000 τεμαχίων αντιστοιχεί δειγματοληψία 100 τεμαχίων. Επίσης, στο παράρτημα II της Οδηγίας 76/211/ΕΟΚ ορίζονται τα 80 δείγματα για δυναμικότητα παρτίδας άνω των 3201 τεμαχίων κατά το σχεδιασμό διπλού σχεδίου δειγματοληψίας και είναι αυτό που εφαρμόζεται σε επίσημο έλεγχο.

Analyse. Πέρα από τα μεγέθη της περιγραφικής στατιστικής που χρησιμοποιούνται (μέσος όρος, διακύμανση και τυπική απόκλιση), η μεθοδολογία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών εφαρμόζει την τεχνική των **Διαγραμμάτων Ελέγχου** ή αλλιώς **Control Charts**. Η μέθοδος προσδιορίζει την ενδογενή «φυσική» διακύμανση της παραγωγικής διεργασίας. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ακόμα και από την πιο καλά ρυθμισμένη μηχανή δεν μπορούν να βγουν 100 προϊόντα με το ίδιο ακριβώς βάρος. Έτσι, για κάποιο τυχαίο λόγο το βάρος θα κυμαίνεται – θα εμφανίζει μια διακύμανση. Η μεθοδολογία των Control Charts προσδιορίζει το μέσο γύρω από τον οποίο «παίζει» η διακύμανση αυτή και τα άνω και κάτω όριά της (Upper Control Limits, Lower Control Limits). Η διακύμανση μέσα σε αυτά τα όρια οφείλεται σε τυχαία αίτια (*Chance cause – causes due to chance*), ενώ η διακύμανση εκτός των ορίων αυτών οφείλεται σε μη τυχαία αίτια (*Assignable cause – a cause that can be attributed to a reason other than chance*) [4]. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Ας υποθέσουμε ότι λαμβάνονται 25 ομάδες των 4 δειγμάτων μέσα σε μια βάρδια παραγωγής, έτσι ώστε να έχουμε τελικά 100 δείγματα, όπως ορίσαμε παραπάνω με βάση το πρότυπο ANSI / ASQ Z1.9-1993.
- Υπολογίζεται ο μέσος όρος της κάθε ομάδας των X_i παρατηρήσεων – $\bar{X}$ – και το εύρος των τιμών κάθε ομάδας – Range ($\max X_i - \min X_i$). Έτσι προκύπτουν 25 μέσοι όροι και 25 τιμές εύρους. Σημειώνεται ότι σε κάθε μέτρηση ελέγχεται και το απόβρο. Από τους ανωτέρω μέσους όρους, αφαιρείται και το μέσο βάρος του απόβρο, ώστε ο μέσος να είναι το καθαρό βάρος.
- Υπολογίζεται ο μέσος των μέσων των 25 ομάδων ($\bar{\bar{X}}$) και η τυπική απόκλιση $\sigma_{\bar{X}}$ των μέσων από την κεντρική τους τιμή ($\bar{\bar{X}}$). Υπολογίζεται η μέση τιμή εύρους $\bar{R}$ των 25 ομάδων και η τυπική απόκλιση σ_R .
- Υπολογίζονται οι τιμές:

$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + 3 \cdot \sigma_{\bar{X}}$	$UCL_R = \bar{R} + 3 \cdot \sigma_R$
$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - 3 \cdot \sigma_{\bar{X}}$	$LCL_R = \bar{R} - 3 \cdot \sigma_R$

- Με τη χρήση των ανωτέρω κατασκευάζονται τα $\bar{X}$ και R Control Charts. Στο $\bar{X}$ απεικονίζονται τα USL, LSL, $UCL_{\bar{X}}$, $LCL_{\bar{X}}$, $\bar{X}_{pack}$ ($\bar{X}_{pack}$ είναι το ονομαστικό καθαρό βάρος του προϊόντος).



- Ακολουθεί οπτική παρατήρηση των διαγραμμάτων αυτών ως προς:
 - ✓ Τον έλεγχο της παραγωγικής διεργασίας (κίνηση του $\bar{X}$ μέσα στις κόκκινες ευθείες). Ο έλεγχος ξεκινάει από το R chart καθώς βίαιες, εκτός ορίων (πάνω το το UCLR) και συνεχόμενες αποκλίσεις μπορεί να μας οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι άλλαξε ο $\bar{X}$, άρα οι παρατηρούμενες τιμές αναφέρονται σε μετατόπιση του μέσου. Αυτό σημαίνει μπορεί δυνητικά να σημαίνει ότι το ληφθέν δείγμα αναφέρεται σε 2 διαφορετικούς πληθυσμούς, δηλαδή σε σημαντική απορύθμιση της μηχανής, αλλαγή χειριστή μηχανής κλπ.

Ο έλεγχος συνεχίζεται στο $\bar{X}$ chart, όπου θεωρείται ότι η παραγωγική διεργασία είναι εκτός ελέγχου αν, μεταξύ άλλων:

- βρεθεί κάποια τιμή $\bar{X}$ εκτός των $UCL_{\bar{X}}$ και $LCL_{\bar{X}}$
- βρεθούν 7 συνεχόμενες τιμές σε μία μόνο πλευρά εκατέρωθεν του μέσου
- βρεθούν 6 τιμές συνεχώς αυξανόμενες ή μειούμενες, κ.λπ.

Στην περίπτωση που διαπιστώνεται ότι η παραγωγική διεργασία είναι εκτός ελέγχου σημαίνει ότι κάποιο μη τυχαίο αίτιο συνέβη κατά την παραγωγή.

- ✓ Την απόκλιση του μέσου $\bar{X}$ ως προς την αναγραφόμενη καθαρή ποσότητα των τεμαχίων X_{pack} , αλλά και πιθανώς του $LCL_{\bar{X}}$ από το X_{pack} με στόχο την απόδειξη ότι ο μέσος ή ακόμα χειρότερα το κάτω όριο της φυσικής διακύμανσης της παραγωγικής διεργασίας βρίσκεται πάνω από το X_{pack} . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η παραγωγική διεργασία δεν είναι κεντραρισμένη πάνω στο X_{pack} , αλλά είναι σχεδιασμένη ώστε να προσφέρει στον καταναλωτή περισσότερο προϊόν σε σχέση με το αναγραφόμενο. Το worst case σενάριο για τη βιομηχανία που είναι ταυτόχρονα best case για τον καταναλωτή είναι το $LCL_{\bar{X}} > X_{pack}$ που σημαίνει ότι η παραγωγική διεργασία έχει σχεδιαστεί ώστε όλη η φυσική διακύμανσή της να βρίσκεται πάνω από την αναγραφόμενη ποσότητα, όταν την ίδια στιγμή το νομοθετικό όριο ανοχής βρίσκεται πολύ πιο χαμηλά. **Αυτή είναι η περίπτωση όπου υπάρχει περιθώριο βελτίωσης κόστους.**

- Υπολογίζεται η τυπική απόκλιση του πληθυσμού (των 100 δειγμάτων) και από εκεί η **Ικανότητα Παραγωγής (Process Capability – Cp)**:

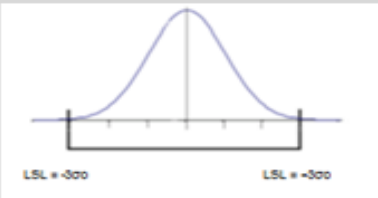
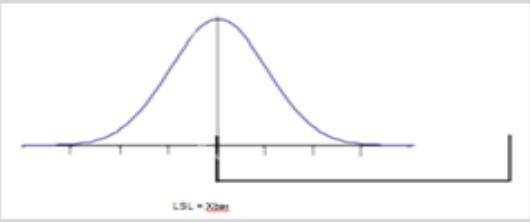
$$Cp = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

Ουσιαστικά, πρόκειται για το μέγεθος που προσδιορίζει πόσο πιο μεγάλος ή πιο μικρός είναι ο διάδρομος των κόκκινων ευθειών σε σχέση με τις μπλε ευθείες (Διάγραμμα 1). Οι 6 τυπικές αποκλίσεις γύρω από το μέσο μιας κανονικής κατανομής περιλαμβάνουν το 99,73% τιμών των παρατηρήσεων μιας διεργασίας. Δηλαδή, η πιθανότητα να βρεθεί μια παρατήρηση εντός των ορίων που ορίζουν οι γραμμές $\mu \pm 3\sigma$ είναι 99,73%, εφόσον η διεργασία από την οποία προήλθε ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Επιπλέον, υπολογίζεται ο **Δείκτης Ικανότητας Παραγωγής (Process Capability Index – Cpk)**:

$$Cpk = \frac{\min(USL - \bar{X}) \text{ or } (\bar{X} - LSL)}{3\sigma}$$

Ισχύει ότι αν:

✓ $Cp = 1$ και $Cpk = 1$, τότε $USL - LSL = 6\sigma$ ή, όπως φαίνεται στο δίπλα διάγραμμα, η φυσική διακύμανση της παραγωγικής μας διεργασίας είναι ίση ακριβώς με τις προδιαγραφές, ενώ και ο μέσος της είναι κεντραρισμένος στο κέντρο της προδιαγραφής.	
✓ $Cp = 1$ και $Cpk = 0$, τότε $USL - LSL = 6\sigma$, αλλά ο μέσος είναι κεντραρισμένος στο άνω ή κάτω όριο της προδιαγραφής, δηλαδή είναι μετατοπισμένος κατά 3σ που σημαίνει ότι κατά 3σ γίνεται παραγωγή σκάρτων. Διαγραμματικά:	

Γενικά, το $C_p = 1$ είναι κατάσταση μη επιθυμητή σε μια διεργασία καθώς μετακινήσεις του μέσου μπορούν να μας θέσουν εύκολα εκτός προδιαγραφών.

✓ $C_p < 1$, σημαίνει ότι η φυσική διακύμανση της παραγωγικής διεργασίας είναι «ξεχειλωμένη» και υπερσκελίζει τις προδιαγραφές. Άρα συστηματικά παράγεται μη συμμορφούμενο – σκάρτο προϊόν. Είναι σαφώς μη επιθυμητή κατάσταση.

✓ $C_p > 1$, σημαίνει ότι η παραγωγική μας διεργασία είχε σχεδιαστεί ώστε η διακύμανση της να βρίσκεται άνετα εντός των προδιαγραφών. Η Motorola έχει σχεδιάσει τις διεργασίες της έτσι ώστε να βρίσκονται στο 1,66. Ιδεατή θεωρείται η τιμή $C_p = 2$, δηλαδή το άνοιγμα της καμπάνας να είναι το μισό των προδιαγραφών. Όμως για να συμβεί αυτό πρέπει η τυπική απόκλιση να είναι πολύ μικρή που μπορεί να σημαίνει βελτίωση στα **3 δομικά στοιχεία από τα οποία πηγάζει η διακύμανση μιας διεργασίας**:

- Εξοπλισμός
- Άνθρωποι
- Περιβάλλον

Improve. Όπως αναφέρθηκε, το αμέσως επόμενο βήμα από την ανάλυση των μετρήσεων είναι η διερεύνηση του προβλήματος που πιθανώς εντοπίζεται. Εν προκειμένω, θεωρείται θεμελιώδους σημασίας ο έλεγχος π.χ. δοσομετρητών στις μελετούμενες μηχανές, αλλά και των checkweigher όπου υπάρχουν.

Βασικά σημεία βελτίωσης ώστε να κλείσει το άνοιγμα της καμπάνας είναι:

- ✓ Έλεγχος ικανότητας δοσομετρητών μηχανών (τελευταία συντήρηση, παλαιότητα, βαθμονόμηση)
- ✓ Έλεγχος ικανότητας checkweighers (τελευταία συντήρηση, παλαιότητα, βαθμονόμηση)
- ✓ Έλεγχος ικανότητας ανθρώπων – γνωρίζουν όλοι οι τεχνικοί σωστά τη δουλειά τους;
- ✓ Έλεγχος ικανότητας περιβάλλοντος – είναι ικανές οι συνθήκες να προσφέρουν ευκολία στην εργασία των τεχνικών; Φως, σκόνη, θόρυβος...

Control. Εφόσον προσδιοριστούν οι πιθανές βελτιώσεις γίνεται εφαρμογή στις συσκευαστικές μηχανές. Προκειμένου για την επικύρωση της ορθότητας και της νομιμότητας εφαρμόζεται ο κανόνας δειγματοληψίας της Οδ.76/211/EOK. Ο έλεγχος με βάση το ανωτέρω πλάνο δειγματοληψίας πρέπει να πραγματοποιείται σε ετήσια βάση, ενώ σε κάποιες βιομηχανίες η ανωτέρω μελέτη με διαγράμματα και αξιολόγηση πραγματοποιείται σε μηνιαία βάση με τη βοήθεια online λογισμικού των checkweighers.

Ο **Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών** είναι ένα εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση κόστους παραγωγής, όπως είδαμε στο ανωτέρω παράδειγμα καθαρού βάρους, αλλά μπορεί να βοηθήσει και στον έλεγχο πολλών παραμέτρων κατά την παραγωγική διαδικασία, όπως λ.χ την παρακολούθηση ή επαλήθευση ενός CCP ή ενός συστήματος καθαρισμού CIP σε σχέση με το σχηματισμό biofilms, συμβάλλοντας στην ενίσχυση συστημάτων παρακολούθησης κρίσιμων παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας τροφίμων.

Βιβλιογραφία

- [1]. http://en.wikipedia.org/wiki/Six_Sigma
- [2]. Evans, J.R., Lindsay, W.M., "The Management and Control of Quality", 5th Edition, 2002
- [3]. ANSI / ASQ Z1.9-1993 – Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Nonconforming
- [4]. Besterfield, D.,H., "Quality Control", 6th Edition, Prentice Hall, 2001