

# Υπολογισμός της ευστάθειας των ελκυστήρων σε εργασίες χωματουργικές και διαχείρισης λιβαδιών

**Π. Β. Καραρίζος και Α.Ε. Καραγιάννης**

Εργαστήριο Μηχανικών Επιστημών και Τοπογραφίας, Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: pkarariz@for.auth.gr

## Περίληψη

Ο υπολογισμός της ευστάθειας των ελκυστήρων είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα του οποίου η λύση απαιτεί την πλήρη και ασφαλή γνώση όλων των παραγόντων που την επηρεάζουν. Οι παράγοντες αυτοί είναι τα τεχνικά στοιχεία του ελκυστήρα, δηλαδή η ιπποδύναμη, το βάρος, το περίγραμμα στήριξης, η ταχύτητα κίνησης, το ύψος του κέντρου βάρους, η ανάρτηση, οι αποσβεστήρες (αμορτισέρ), τα ελαστικά, το μέγεθος του φορτίου ελκόμενων και φερόμενων μηχανισμών, καθώς και το μήκος και το ύψος της ζεύξης τους. Οι παράγοντες όμως που επηρεάζουν καθοριστικά την ευστάθεια είναι η κλίση και η κατηγορία του εδάφους, καθώς και η φυγόκεντρη δύναμη στις στροφές. Κατά τις στροφές των ελκυστήρων αναπτύσσονται, όπως είναι γνωστό, φυγόκεντρικές τάσεις που μπορεί να προκαλέσουν κάτω από ορισμένες συνθήκες αστάθεια και πλάγια ανατροπή του ελκυστήρα. Στην εργασία αυτή προσδιορίστηκε η ροπή ευστάθειας στις στροφές, ενός κλασικού τετράτροχου δασικού ελκυστήρα. Για το σκοπό αυτό καταρτίστηκε ένα πρόγραμμα στον ΗΥ και υπολογίστηκαν οι συνθήκες ισορροπίας σε σχέση με: α) την απόσταση εφαρμογής του κέντρου βάρους του μηχανήματος από το σημείο επαφής τροχού-εδάφους ( $X_g$ ) (μέσο επίπεδο ελαστικού), β) το ύψος εφαρμογής του κέντρου βάρους ( $Y_g$ ), γ) την ταχύτητα μετακίνησης ( $v$ ) και δ) την ακτίνα περιστροφής ( $r$ ). Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η ευστάθεια κατά τις στροφές σε οριζόντιο έδαφος είναι μικρή όταν το περίγραμμα στήριξης είναι μικρό (απόσταση εφαρμογής του κέντρου βάρους  $X_g$ ), το ύψος του κέντρου βάρους μεγάλο, η ταχύτητα κίνησης ( $v$ ) μεγάλη και η ακτίνα περιστροφής μικρή.

**Λέξεις κλειδιά:** Ευστάθεια, φυγόκεντρος δύναμη, κέντρο βάρους.

## Εισαγωγή

Στην Ελλάδα όπως και στο εξωτερικό κάθε χρόνο συμβαίνει ένας πολύ μεγάλος αριθμός θανατηφόρων ατυχημάτων τα οποία προέρχονται από τις ανατροπές των δασικών και γεωργικών ελκυστήρων, που οφείλονται τις περισσότερες φορές σε απώλεια της σταθερότητας και του ελέγχου.

Οι ελκυστήρες είναι αναγκασμένοι να λειτουργούν σε εδαφικές συνθήκες συχνά πολύ δυσμενείς στις χωματουργικές και στις εργασίες βελτίωσης των λιβαδιών και λειμώνων, οι οποίες είναι δυνατό να προκαλέσουν αστάθεια του ελκυστήρα και ανατροπή προς τα πίσω ή πλάγια πτώση ή ακόμη και ολοκληρωτική ανατροπή. Τέτοιες καταστάσεις εμφανίζονται κυρίως σε επικλινή εδάφη. Όταν μάλιστα υπάρχει και μεγάλη μεταφορά φορτίου από τους πρόσθιους στους οπίσθιους τροχούς, η ανατροπή προς τα πίσω ή πλάγιως είναι πολύ πιθανή (Kim et al. 1990, Γιαλαμάς και συν. 2003).

Τα περισσότερα ατυχήματα στη Βρετανία συμβαίνουν σε βοσκοτόπους, όπου οι χρησιμοποιούμενες κλίσεις είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις καλλιεργούμενες εκτάσεις. Τα

αποτελέσματα εκτεταμένης έρευνας στο Scottish Institute of Agricultural Engineering, (S.I.A.E) κατέληξαν σε μία εμπειριστατωμένη θεωρία που μπορεί να αναλύσει οποιαδήποτε ανατροπή τέτοιου μηχανήματος (Hunter 1981).

Ο υπολογισμός της ευστάθειας των ελκυστήρων είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα του οποίου η λύση απαιτεί την ασφαλή γνώση όλων των παραγόντων που την επηρεάζουν. Οι παράγοντες αυτοί είναι τα τεχνικά στοιχεία του ελκυστήρα δηλαδή η υποδύναμη, το βάρος, το περίγραμμα στήριξης, η ταχύτητα κίνησης, το ύψος του κέντρου βάρους, η ανάρτηση, οι αποσβεστήρες (αμορτισέρ), τα ελαστικά, το μέγεθος του φορτίου των ελκόμενων και φερόμενων μηχανισμών καθώς και το μήκος και το ύψος ζεύξης των (Liu et.al. 1999). Οι παράγοντες όμως που επηρεάζουν καθοριστικά την ευστάθεια είναι η κλίση και η κατηγορία του εδάφους καθώς και η φυγόκεντρη δύναμη στις στροφές. Κατά τις στροφές των ελκυστήρων αναπτύσσονται, όπως είναι γνωστό, φυγοκεντρικές τάσεις που μπορεί να προκαλέσουν κάτω από ορισμένες συνθήκες αστάθεια και πλάγια ανατροπή του ελκυστήρα (Crolla and Spenser 1984).

Η απώλεια της σταθερότητας προκύπτει όταν οι αντιδράσεις των τροχών μεταβάλλονται λόγω της αλλαγής πορείας αριστερά ή δεξιά και κυρίως όταν προκαλούν τον μηδενισμό τους (Τσατσαρέλης 1997). Επομένως είναι απαραίτητο να τίθενται όρια ευστάθειας και ελέγχου στις αγροτικές και δασικές εργασίες των ελκυστήρων που πρέπει να πραγματοποιούνται χωρίς επικίνδυνους ελιγμούς (Gilfillan 1978).

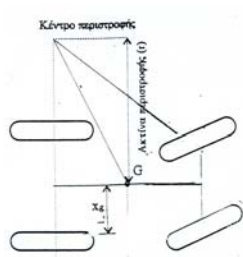
Γενικά ο προσανατολισμός των ερευνών ήταν να δημιουργηθούν ασφαλή πρότυπα ώστε να είναι δυνατό να προβλέπεται η κατάσταση ευσταθούς ή ασταθούς ισορροπίας στην κίνηση των δασικών και γεωργικών ελκυστήρων (Schwanghart 1981, Rehkugler and Kelly 1988).

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο υπολογισμός της πλάγιας ευστάθειας στις στροφές των δασικών και γεωργικών ελκυστήρων στις χωματουργικές εργασίες διαχείρισης και βελτίωσης των λιβαδιών και λειμώνων για την αποφυγή ανατροπών ή πλάγιων πτώσεων που προκαλούν κυρίως ατυχήματα με τραυματισμούς ή θανάτους και υλικές ζημιές.

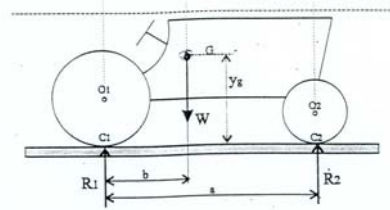
## **Υλικά και μέθοδοι**

Για να υπολογισθεί η πλάγια ευστάθεια στις στροφές ενός κλασικού τετράτροχου ελκυστήρα, καταρτίστηκε ένα πρόγραμμα στον H/Y με το οποίο επεξεργάστηκαν όλα τα στοιχεία που αφορούν, τις φυγοκεντρικές τάσεις που αναπτύσσονται, τις ροπές ευστάθειας ( $Wxg$ ) και ( $Wyg$ ), τις τιμές της ακτίνας περιστροφής ( $r$ ) καθώς και την ταχύτητα μετακίνησης ( $v$ ). Τροφοδοτήθηκε ο H/Y στην πρώτη φάση της επεξεργασίας, με μεταβλητές τιμές της ταχύτητας μετακίνησης ( $v$ ) του ελκυστήρα και με σταθερές τις τιμές του ύψους εφαρμογής του κέντρου βάρους του μηχανήματος από το έδαφος ( $Yg$ ), της απόστασης εφαρμογής του κέντρου βάρους του μηχανήματος από το σημείο επαφής τροχού-εδάφους ( $Xg$ ) καθώς και της ακτίνας περιστροφής ( $r$ ). Στη δεύτερη, τρίτη και τέταρτη φάση της επεξεργασίας τροφοδοτήθηκε αντίστοιχα ο H/Y με μεταβλητές τιμές του ύψους ( $Yg$ ), της απόστασης ( $Xg$ ) και της ακτίνας περιστροφής ( $r$ ). Από τα αποτελέσματα προέκυψε πόσο και ποιος παράγοντας επηρεάζει για να βρεθεί ο ελκυστήρας σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας. Οι τιμές με τις οποίες τροφοδοτήθηκε ο H/Y με την ταχύτητα ( $v$ ), το ύψος ( $Yg$ ), την απόσταση ( $Xg$ ) και την ακτίνα περιστροφής, ήταν μέσες τιμές σύμφωνα και με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ενημερωτικών δελτίων των εταιρειών.

Στα σχήματα 1 και 2 φαίνονται όλες οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στις στροφές του ελκυστήρα μαζί με τις αποστάσεις ( $Xg$ ) και ( $Yg$ ).



Σχήμα 1. Κάτοψη ελκυστήρα με την απόσταση του σημείου εφαρμογής του κέντρου βάρους (Xg) από το σημείο επαφής του τροχού.



Σχήμα 2. Τομή ελκυστήρα με το ύψος του κέντρου βάρους (Yg) από το έδαφος.

Η φυγόκεντρος δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της στροφής και ενεργεί στο κέντρο βάρους του ελκυστήρα είναι:

$$\frac{mu^2}{r} \text{ ή } \frac{Wu^2}{gr} \quad (1)$$

Ο ελκυστήρας θα βρεθεί σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας όταν η αντίδραση του εδάφους  $R_1$  (σχήμα 2) του αριστερού τροχού καταστεί μηδενική.

Η ροπή ανατροπής είναι:

$$\frac{mu^2}{r} y_g \text{ όπου } (2) \quad Yg = \text{το ύψος του κέντρου βάρους}$$

$u =$  η ταχύτητα μετακίνησης

$r =$  η ακτίνα περιστροφής.

Η ροπή ευστάθειας, όπως θα μπορούσε να ονομασθεί είναι  $WXg$  όπου  $Xg$  η απόσταση του κέντρου βάρους από το σημείο επαφής τροχού-εδάφους (μέσο επίπεδο του ελαστικού).

Για να επέλθει η ανατροπή θα πρέπει να είναι:

$$\frac{mu^2}{r} y_g \geq WXg \quad (3) \quad \text{ ή } \quad \frac{Wu^2}{gr} y_g \geq WXg \quad (4) \quad \text{ απ' όπου υπολογίζεται η ταχύτητα:}$$

$$u \geq \sqrt{\frac{x_g gr}{y_g}} \quad (5)$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι εκτός από τις κύριες δυνάμεις που ελήφθησαν υπόψη υπάρχουν και άλλες όπως η κίνηση του πετρελαίου στο τεπόζιτο, η κίνηση του λαδιού στο carter και οι διαφορετικές παραμορφώσεις των ελαστικών του εξωτερικού και εσωτερικού τροχού, που μάλλον τείνουν να αυξήσουν την αστάθεια του ελκυστήρα.

## Αποτελέσματα και συζήτηση

Ύστερα από την επεξεργασία όλων των παραπάνω αναφερθέντων στοιχείων προέκυψαν οι παρακάτω πίνακες 1, 2, 3 και 4.

Στον πίνακα 1 φαίνονται τα αποτελέσματα με τις επιτρεπόμενες και απαγορευτικές τιμές της ταχύτητας ( $u$ ) για την ευστάθεια ή την ανατροπή του ελκυστήρα στις στροφές.

Από τον πίνακα 1 προκύπτει ότι η μεγαλύτερη ταχύτητα εργασίας που προκαλεί την ανατροπή του ελκυστήρα είναι αυτή των 10 χλμ./ώρα. Αυτό ισχύει όταν έχουμε το ύψος εφαρμογής του κέντρου βάρους ( $Yg$ ) του ελκυστήρα ίσο με 1,0 μ., την απόσταση εφαρμογής του κέντρου βάρους από τον τροχό ( $Xg$ ) ίση με 0,7 μ. και την ακτίνα περιστροφής ( $r$ ) ίση με 12 μ.

*Πίνακας 1. Συνθήκες ευστάθειας σε σχέση με την ταχύτητα (v).*

A/A	Ταχύτητα (v) (χλμ./ώρα)	Ύψος Yg (μ.)	Απόσταση Xg (μ.)	Ακτίνα περιστροφής r (μ.)	Συνθήκη	
					Ανατροπής	Ευστάθειας
1	6	1,0	0,7	12	-	Ναι
2	7	1,0	0,7	12	-	Ναι
3	8	1,0	0,7	12	-	Ναι
4	9	1,0	0,7	12	-	Ναι
5	10	1,0	0,7	12	Ναι	-
6	11	1,0	0,7	12	Ναι	-
7	12	1,0	0,7	12	Ναι	-
8	13	1,0	0,7	12	Ναι	-
9	14	1,0	0,7	12	Ναι	-
10	15	1,0	0,7	12	Ναι	-

Στον πίνακα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα με τις επιτρεπόμενες και απαγορευτικές τιμές του ύψους εφαρμογής του κέντρου βάρους (Yg), για την ευστάθεια ή ανατροπή του ελκυστήρα στις στροφές.

*Πίνακας 2. Συνθήκες ευστάθειας σε σχέση με το ύψος (Yg).*

A/A	Ταχύτητα (v) (χλμ./ώρα)	Ύψος Yg (μ.)	Απόσταση Xg (μ.)	Ακτίνα περιστροφής r (μ.)	Συνθήκη	
					Ανατροπής	Ευστάθειας
1	10	0,70	0,7	12	-	Ναι
2	10	0,75	0,7	12	-	Ναι
3	10	0,80	0,7	12	-	Ναι
4	10	0,85	0,7	12	Ναι	-
5	10	0,90	0,7	12	Ναι	-
6	10	1,0	0,7	12	Ναι	-
7	10	1,05	0,7	12	Ναι	-
8	10	1,10	0,7	12	Ναι	-
9	10	1,15	0,7	12	Ναι	-
10	10	1,20	0,7	12	Ναι	-

Από τον πίνακα 2 προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ύψος του κέντρου βάρους (Yg) που προκαλεί την ανατροπή του ελκυστήρα είναι 0,85 μ. Αυτό ισχύει όταν έχουμε την ταχύτητα εργασίας (v) ίση με 10 χλμ./ώρα, την απόσταση εφαρμογής του κέντρου βάρους από τον τροχό (Xg) ίση με 0,7 μ. και την ακτίνα περιστροφής (r) ίση με 12 μ.

Στον πίνακα 3 φαίνονται τα αποτελέσματα με τις επιτρεπόμενες και απαγορευτικές τιμές της απόστασης εφαρμογής του κέντρου βάρους από τον τροχό (Xg), για την ευστάθεια ή ανατροπή του ελκυστήρα.

*Πίνακας 3. Συνθήκες ευστάθειας σε σχέση με την απόσταση (Xg).*

A/A	Ταχύτητα (v) (χλμ./ώρα)	Ύψος Yg (μ.)	Απόσταση Xg (μ.)	Ακτίνα περιστροφής r (μ.)	Συνθήκη	
					Ανατροπής	Ευστάθειας
1	10	1,0	0,50	12	Ναι	-
2	10	1,0	0,55	12	Ναι	-
3	10	1,0	0,60	12	Ναι	-
4	10	1,0	0,65	12	Ναι	-
5	10	1,0	0,70	12	Ναι	-
6	10	1,0	0,75	12	Ναι	-
7	10	1,0	0,80	12	Ναι	-
8	10	1,0	0,85	12	Ναι	-
9	10	1,0	0,90	12	-	Ναι
10	10	1,0	0,95	12	-	Ναι

Από τον πίνακα 3 προκύπτει ότι η μεγαλύτερη απόσταση εφαρμογής του κέντρου βάρους από τον τροχό (Xg) που προκαλεί την ανατροπή του ελκυστήρα είναι 0,85 μ. Αυτό ισχύει όταν η ταχύτητα εργασίας (v) είναι ίση με 10 χλμ./ώρα, το ύψος εφαρμογής του κέντρου βάρους (Yg), ίσο με 1,0 και η ακτίνα περιστροφής (r) ίση με 12 μ.

Στον πίνακα 4 φαίνονται τα αποτελέσματα με τις επιτρεπόμενες και απαγορευτικές τιμές της ακτίνας περιστροφής (r), για την ευστάθεια ή ανατροπή του ελκυστήρα.

*Πίνακας 4. Συνθήκες ευστάθειας σε σχέση με την ακτίνα περιστροφής (r).*

Α/Α	Ταχύτητα (v) (χλμ./ώρα)	Ύψος Yg (μ.)	Απόσταση Xg (μ.)	Ακτίνα περιστροφής r (μ.)	Συνθήκη	
					Ανατροπής	Ευστάθειας
1	10	1,0	0,7	9	Ναι	
2	10	1,0	0,7	9,5	Ναι	
3	10	1,0	0,7	10	Ναι	
4	10	1,0	0,7	10,5	Ναι	
5	10	1,0	0,7	11	Ναι	
6	10	1,0	0,7	12	Ναι	
7	10	1,0	0,7	13	Ναι	
8	10	1,0	0,7	14	Ναι	
9	10	1,0	0,7	15		Ναι
10	10	1,0	0,7	16		Ναι

Από τον πίνακα 4 προκύπτει ότι η μεγαλύτερη ακτίνα περιστροφής (r) που προκαλεί την ανατροπή του ελκυστήρα είναι 14 μ. Αυτό ισχύει όταν έχουμε την ταχύτητα εργασίας (u) ίση με 10 χλμ./ώρα, το ύψος εφαρμογής του κέντρου βάρους του ελκυστήρα (Yg) ίσο με 1,0 μ. και την απόσταση εφαρμογής του κέντρου βάρους από τον τροχό (Xg) ίση με 0,7 μ.

## Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- 1) Το μεγαλύτερο όριο της ταχύτητας εργασίας (v) για την ανατροπή του ελκυστήρα με τα συγκεκριμένα τεχνικά στοιχεία είναι  $v \leq 9$  χλμ./ώρα.
- 2) Το μεγαλύτερο όριο του ύψους εφαρμογής του κέντρου βάρους (Yg) για την ανατροπή του ελκυστήρα πρέπει να είναι  $Yg \leq 0,85$  μ.
- 3) Το μεγαλύτερο όριο της απόστασης εφαρμογής του κέντρου βάρους από τον τροχό (Xg) για την ανατροπή του ελκυστήρα πρέπει να είναι  $Xg \leq 0,85$  μ. και
- 4) Το μεγαλύτερο όριο της ακτίνας καμπυλότητας (r) για την ανατροπή του ελκυστήρα πρέπει να είναι  $r \leq 14$  μ.

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η ευστάθεια κατά τις στροφές σε οριζόντιο έδαφος είναι μικρή όταν το περίγραμμα στήριξης είναι μικρό (απόσταση εφαρμογής του κέντρου βάρους Xg), το ύψος εφαρμογής του κέντρου βάρους (Yg) μεγάλο, η ταχύτητα κίνησης (v) μεγάλη και η ακτίνα περιστροφής (r) μικρή.

## Βιβλιογραφία

- Γιαλαμάς, Α.Θ., Ι.Ζ. Κουτσοφίτης και Θ.Α. Φιλίντας. 2003. Τράπεζα δοκιμών για τον καθαρισμό της ευστάθειας γεωργικών μηχανημάτων. Πρακτ. 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής της Εταιρίας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος. ΕΓΜΕ. Θεσσαλονίκη, σελ. 238-245.
- Crolla, D. A. and H. B.Spencer. 1984. Tractor handling during control loss on sloping ground. *Vehicles System Dynamics*. 13:1. 1-17.

- Gilfiland, G. 1978. Polar diagram representation of tractor stability and control on slope. Scottish of Agricultural Engineering. Technical report No.I.SIAE. Bush Estate. Penicuik, Midlothian EH26, OPH. Hunter. AGM. 1981. Tractor safety on slopes. Agricultural Manpower, (3) 26.
- Hunter, AGM. 1981. Tractor safety on slopes. Agricultural Manpower, 36: 4, 95-98.
- Kim, K.U., V.M. Salokhe and S.G. Iangantileke. 1990. Lateral stability of agricultural tractors of slopes, p. 19-28. Proc. of international agricultural engineering conference and exhibition. Bangkok. Thailand.
- Liu, J., P.D. Ayers and B. Nafziger. 1999. Development of stability index for tractors. In: proceeding of the Second National Conference for NIOSH sponsored Agricultural Health and Safety Centers, 27-27 March, Fort Collins. Colo: Colorado State University.
- Rehkugler, G.E. and E.J. Kelly. 1980. Stability criteria for operation on side slopes. ASAE Special Publication Engineering a Safer Food Machine.
- Schwanghart, H. 1981. Measurement of forces on steered non driven wheels. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference (ISTVS), 16-20 August Vol. 1 335-356.
- Τσατσαρέλης, Α.Κ. 1997. Γεωργικοί Ελκυστήρες. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούδη. Θεσσαλονίκη.

## **The calculation of stability of tractors in earthworks and in the management and improvement of rangelands and meadows**

**P.B. Kararizos and A.E. Karayannis**

Laboratory of Mechanical Sciences and Surveying, School of Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24 Thessaloniki, Greece,  
e-mail: pkarariz@for.auth.gr

### **Summary**

The calculation of tractors stability is a complicated problem the solution of which requires the full and safe knowledge of all factors affecting it. These factors are the technical components of the tractors such as the horsepower, the weight, the template of support, the velocity of movement, the height of gravity center, the suspension, the shock absorbers, the tires, the size of load of the hauled and carried machinery as well as the length and the height of their coupling. However, these factors which affect definitely the stability are the slope and the category of soil as well as the centrifugal force in turns. During the turns of tractors are developed, as is known, centrifugal tensions that may cause, under specific conditions, instability and side overturning of the tractor. In this paper was determined the moment of stability ( $WX_g$ ) in the turns, of a classic four-wheel forest tractor. For this purpose was compiled a computer program and was calculated the moment of stability in respect to the distance ( $X_g$ ) of the machine's gravity center from the contact point of the wheel-ground (average level of tire), the height ( $Y_g$ ) of gravity center, the velocity of movement ( $u$ ) and the revolution radius ( $r$ ). From the results it came out that the stability, during the turns at horizontal ground, is small when the template of support is small, the height of gravity center big, the velocity of movement big and the radius of revolution small.

**Key words:** Stability, centrifugal force, gravity center.