

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΒΡΑΧΩΝ «ROCKFALL»

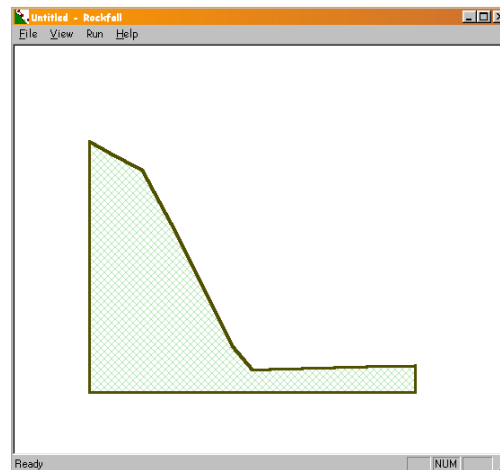
Επιστημονικός υπεύθυνος: Μιχαήλ Γ. Σακελλαρίου,
mgsakel@mail.ntua.gr, <http://users.ntua.gr/mgsakel/>

Ανάλυση – προγραμματισμός: Στέφανος Κοζάνης,
S.Kozanis@mail.ntua.gr, <http://users.ntua.gr/soulman/>

Δικαιώματα, Copyright (C) 1999-2001, Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής,

Τμήμα Αγρ. Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Το **Rockfall** είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης της κατάπτωσης βραχοτεμαχίων σε μία πλαγιά. Χρησιμοποιεί ανάλυση στις 2 διαστάσεις, τα δε βραχοτεμάχια θεωρούνται ιδεατά σώματα με κίνηση στο επίπεδο που περιγράφεται με γραμμικές συνιστώσες. Η στροφορμή θεωρείται μηδέν. Το λογισμικό διαθέτει γραφικό περιβάλλον, μπορεί να εκτελεστεί σε *Windows 95* ή και νεότερα. Ο προγραμματισμός έγινε με *Microsoft Visual C++ 5*. Αφού γίνει η εκκίνηση του προγράμματος εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη:



Το λογισμικό έχει την κλασική εμφάνιση και λειτουργικότητα των προγραμμάτων Windows. Στο πάνω μέρος βρίσκεται η μπάρα με τα μενού (**F**ile **V**iew **R**un **H**elp). Στην κύρια οθόνη παρουσιάζεται η τομή της πλαγιάς και οι καταπτώσεις των βράχων.

Οι προϋποθέσεις για να εκτελεστεί το πρόγραμμα είναι:

Να υπάρχει εγκατεστημένο στον φάκελο `\WINDOWS\SYSTEM` το αρχείο `mfc42.dll`. Συνήθως θα υπάρχει από εγκατάσταση άλλου προγράμματος, αν όμως δεν υπάρχει πρέπει να το κατεβάσετε από την Microsoft (<http://www.microsoft.com>). Στις διεθνείς ρυθμίσεις του control panel (πίνακας ελέγχου) των *Windows*, πρέπει να έχει οριστεί ως list separator (διαχωρισμός λίστας) το ελληνικό ερωτηματικό (;).

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η εισαγωγή δεδομένων γίνεται με την βοήθεια ενός Text αρχείου (αρχείου κειμένου). Με έναν text editor όπως ο notepad των Windows (*Start->Programs->Accessories->Notepad*) μπορείτε να ετοιμάσετε τα δεδομένα. Κατόπιν τα αποθηκεύετε σε κάποιο αρχείο με κατάληξη RCF, π.χ. `data1.rcf`

Η δομή των δεδομένων πρέπει να είναι η παρακάτω:

-αριθμός σημείων-

$x y k_n k_s f$

$x y k_n k_s f$

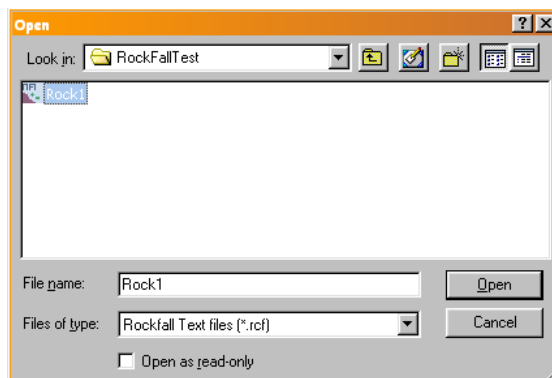
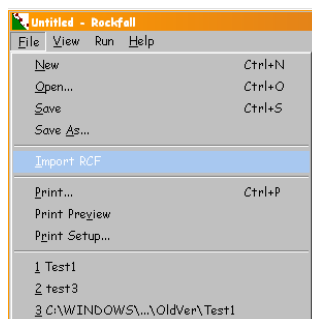
....

Για παράδειγμα:

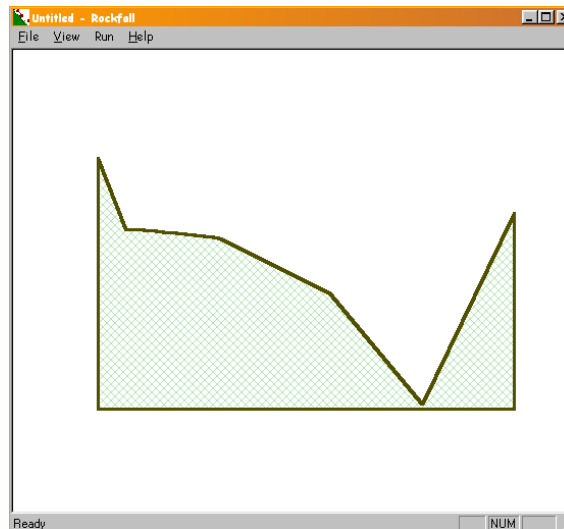
```
7
0.0 0.0 0.4 0.8 0.35
6.0 -15.32 0.4 0.8 0.2
14.0 -16.00 0.4 0.8 0.35
26.0 -17.3 0.4 0.8 0.3
50.0 -29.3 0.4 0.8 0.32
70.0 -53.2 0.4 0.8 0.35
90.0 -12.0 0.4 0.8 0.35
```

Τα παραπάνω δεδομένα περιγράφουν μία πολυγωνική πλαγιά 7 σημείων. Ο αριθμός των σημείων πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός. Ακολουθούν τα σημεία με τις ιδιότητές τους σε τόσες γραμμές όσο ο αριθμός σημείων. Οι τιμές σε μία γραμμή χωρίζονται με απλό κενό ενώ η αλλαγή γραμμής γίνεται με enter. Το x πρέπει να αυξάνει συνεχώς ενώ πρέπει να έχετε υπόψιν πως η ανάλυση γίνεται με τις καταπτώσεις προς τα δεξιά. Ο συντελεστής k_n είναι ο συντελεστής απόσβεσης κατά την ορθή διεύθυνση (1.0 ελαστική κρούση – 0.0 πλήρης απόσβεση και απορρόφηση κινητικής ενέργειας). Ο συντελεστής k_s είναι ο συντελεστής απόσβεσης κατά την εφαπτομενική διεύθυνση. Ο συντελεστής f είναι ο συντελεστής τριβής και πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με το αν θα παρουσιαστεί ολίσθηση ή κύλιση. Οι ιδιότητες αυτές αφορούν την πλευρά της πολυγωνικής που ξεκινάει με το τρέχων σημείο. Έτσι οι ιδιότητες του πρώτου σημείου, αφορούν την πρώτη πλευρά, ενώ οι ιδιότητες του τελευταίου σημείου ουσιαστικά δεν έχουν καμία συμμετοχή.

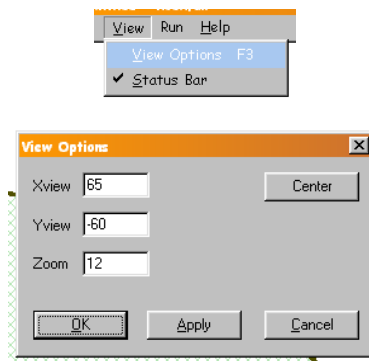
Αφού αποθηκευτούν αυτές οι τιμές σε ένα αρχείο, π.χ. rock1.rcf, μπορούν να ανακληθούν από το rockfall μέσω της εντολής **File -> Import RCF**



Στην ερώτηση αν θέλουμε όντως να φορτώσουμε τα σημεία πατάμε το OK. Τα δεδομένα φορτώνονται και εμφανίζονται στην κύρια οθόνη:



Η εμφάνιση της πλαγιάς μπορεί να αλλάξει μέσω του μενού View->View Options ή με το πάτημα του πλήκτρου F3:



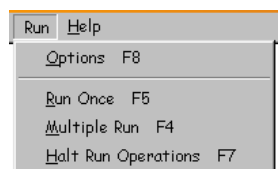
Μέσω του παραπάνω παράθυρου διαλόγου, μπορείτε να αλλάξετε την μεγέθυνση καθώς και το κεντρικό σημείο απεικόνισης.

ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

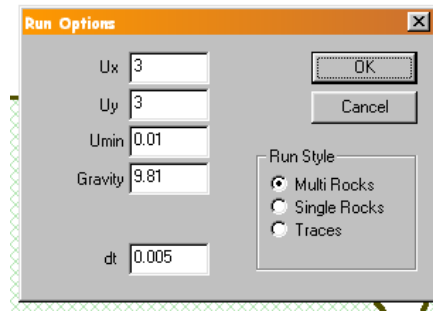
Η προσομοίωση μπορεί να εκτελεστεί με τις εξής δύο μεθόδους:

- Απλή προσομοίωση (Run Once)
- Πολλαπλή προσομοίωση (Multiple Run) κυρίως για στατιστική ανάλυση

Ο έλεγχος της προσομοίωσης γίνεται μέσω του μενού Run:

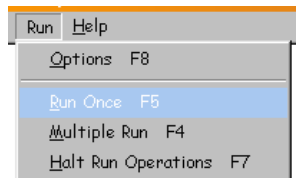


Πατώντας Options ή το πλήκτρο F8, εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο:



Αυτές είναι οι ρυθμίσεις της προσομοίωσης. Τα U_x , U_y περιγράφουν την αρχική ταχύτητα του βραχοτεμαχίου στην περίπτωση της απλής προσομοίωσης (Run Once) σε m/s. Το U_{min} είναι η ελάχιστη ταχύτητα του βραχοτεμαχίου. Σύμφωνα με την U_{min} γίνεται έλεγχος κατά την κρούση, αν η ταχύτητα του βρ/χίου είναι μικρότερη από την U_{min} σταματάει η αναπήδηση και αρχίζει η ολίσθηση ή η κύλιση. Η εκτέλεση της προσομοίωσης τερματίζεται όταν η ταχύτητα του βρ/χίου είναι μικρότερη της U_{min} , υπάρχει κατάσταση ολίσθησης/κύλισης και ο συντελεστής τριβής είναι μεγαλύτερος από την κλίση. Το Gravity είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 . Το dt είναι το βήμα υπολογισμού. Συνιστούνται τιμές dt μικρότερες από 0.1 sec. Επιλέγοντας μία από τις 3 επιλογές του Run Style, αλλάζει η γραφική έξοδος της προσομοίωσης μεταξύ ίχνους βρ/χίων, κινούμενου βρ/χίου ή γραμμής.

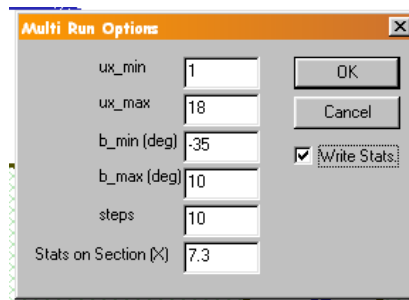
Η απλή προσομοίωση γίνεται με την επιλογή Run->Run Once ή με πάτημα του πλήκτρου F5.



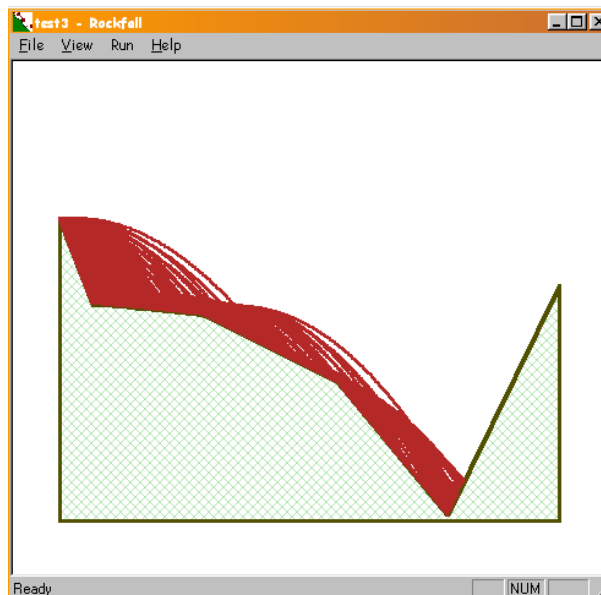
Στην γραφική έξοδο, μεταξύ άλλων, εμφανίζεται η μέγιστη απόσταση που φτάνει το βρ/χιο, η απόσταση τερματισμού και ο πραγματικός χρόνος πραγματοποίησης της κατάπτωσης. Μεταβάλλοντας κατάλληλα το βήμα dt είναι δυνατόν να πραγματοποιήσετε προσομοίωση σε «πραγματικό χρόνο».

Για να τερματίσετε την προσομοίωση χρησιμοποιείτε το μενού Run -> Halt Run Operations ή πατάτε το πλήκτρο F7.

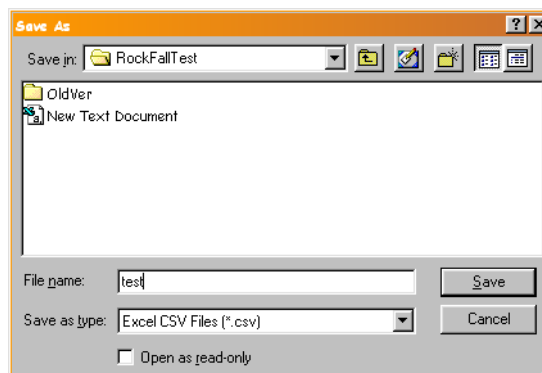
Η στατιστική ανάλυση είναι δυνατή με το Multiple Run. Χρησιμοποιώντας το Menu Run -> Multiple Run ή πατώντας το πλήκτρο F4, παρουσιάζεται το παρακάτω παράθυρο:



Τα u_{x_min} , u_{x_max} είναι η εμβέλεια των αρχικών ταχυτήτων σε m/s. Τα b_{min} , b_{max} είναι η εμβέλεια των αρχικών γωνιών βολής σε μοίρες. Τα $steps$ είναι τα βήματα στις αρχικές ταχύτητες και γωνίες βολής. Έτσι εκτελούνται $steps^2$ προσομοιώσεις λ.χ. για 10 steps \rightarrow 100 προσομοιώσεις. Το stats on Xsection είναι η θέση (X) στην οποία λαμβάνονται στατιστικά για το ύψος και την ταχύτητα των βρ/χίων. Όταν είναι επιλεγμένο το Write Stats. τα στατιστικά εξάγονται σε αρχείο Excel. Εκτελώντας την προσομοίωση, εμφανίζονται 100 διαδοχικές ρίψεις:



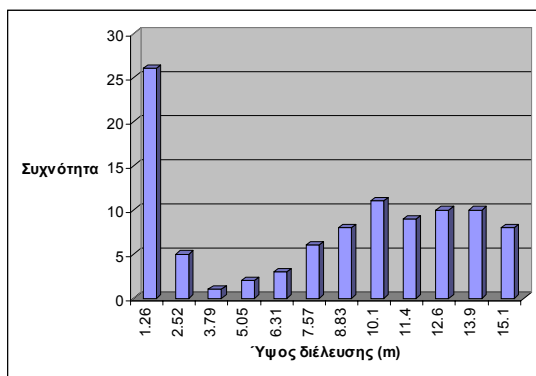
Αν έχει επιλεγεί η εξαγωγή αρχείου (Write Stats.), εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο εισαγωγής αρχείου:



Το εξαγόμενο αρχείο είναι τύπου CSV. Ανοίγοντας το αρχείο που κατασκευάστηκε στο Excel, εμφανίζεται ως εξής:

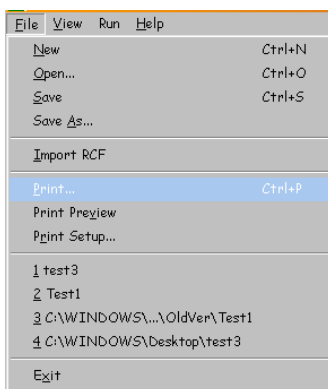
	A	B	C	D	E	F
1	Statistics on 100 falls					
2	10 steps of velocity from 1.000000 m/s to 18.000000 m/s					
3	10 steps of angle from -35.000000 deg to 10.000000 deg					
4						
5	Frequencies of stop distances					
6	Range (m)	Frequency				
7	5.833333	0				
8	11.66667	4				
9	17.5	19				
10	23.33333	11				
11	29.16667	8				
12	35	0				
13	40.83333	0				
14	46.66667	0				
15	52.5	0				
16	58.33333	0				
17	64.16667	0				
18	70	58				
19						
20	Frequencies of max distances					
21	Range (m)	Frequency				

Με τη βοήθεια του excel έπειτα, μπορούν να παραχθούν γραφήματα όπως το παρακάτω:



ΛΟΙΠΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ

Από το μενού **F**ile, μπορεί να γίνει αποθήκευση (**S**ave, Save **A**s...), ανάκληση (**O**pen), δημιουργία νέου εγγράφου (**N**ew) και λειτουργίες εκτύπωσης (**P**rint...) καθώς και ο τερματισμός του προγράμματος (**E**xit):



ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η κατάσταση της προσομοίωσης περιγράφεται μοναδικά από τις παρακάτω παραμέτρους:

- χρόνος από την αρχή t
- κατάσταση λειτουργίας:
 - 1: κίνηση στο κενό
 - 2: κίνηση στο έδαφος
 - 0: τερματισμός προσομοίωσης
- διάνυσμα θέσης $[x, y]^T$
- διάνυσμα ταχύτητας $[u_x, u_y]^T$

Η προσομοίωση γίνεται με την εκτέλεση υπολογιστικών κύκλων (loops). Σε κάθε κύκλο υπολογίζονται τα διανύσματα θέσης και ταχύτητας βάση του βήματος υπολογισμού (δt), υπολογίζεται ο συνολικός χρόνος $t_{j+1} = t_j + \delta t$ και αποδίδεται η κατάσταση λειτουργίας για το επόμενο βήμα με την εκτέλεση των απαραίτητων ελέγχων.

Κίνηση στο κενό

Κίνηση στο κενό γίνεται εφόσον η κατάσταση λειτουργίας είναι «1». Η κίνηση στο κενό περιγράφεται με παραβολική τροχιά. Η νέα ταχύτητα υπολογίζεται από την σχέση:

$$[u_x, u_y]^T = [u_x, u_y - g \delta t]^T$$

ενώ η νέα θέση:

$$[x, y]^T = [x + u_x \delta t, y + u_y \delta t - \frac{1}{2} g \delta t^2]^T$$

το βαθμωτό μέγεθος g είναι το μέτρο της επιτάχυνσης της βαρύτητας, συνήθως λαμβάνεται 9.81 m/s^2 .

Έλεγχος πρόσκρουσης

Αφού η υπολογιστεί η νέα θέση της τροχιάς στο κενό, πρέπει να γίνει έλεγχος πρόσκρουσης με το έδαφος. Έστω $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots$ τα σημεία που περιγράφουν την πολυγωνική της επιφάνειας του εδάφους. Γίνεται έλεγχος σε όλες τις πλευρές του εδάφους.

Αν $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ τότε εκτελείται στην πλευρά $i-i+1$ ο παρακάτω έλεγχος:

-υπολογίζεται το μέγεθος y_0 :

$$y_0 = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i) + y_i$$

Αν $y > y_0$ το βρ/χιο εξακολουθεί να βρίσκεται στο κενό, συνεχίζεται η κατάσταση «1»

Αν $y \leq y_0$ έχει συμβεί πρόσκρουση. Ανακαλείται το τρέχων βήμα δt :

$$[u_x, u_y]^T = [u_x, u_y + g \delta t]^T$$

$$[x, y]^T = [x - u_x \delta t, y - u_y \delta t + \frac{1}{2} g \delta t^2]^T$$

Με την επίλυση δευτεροβάθμιας εξίσωσης, υπολογίζεται κάποιο κατάλληλο $\delta t'$ ώστε να ξαναεκτελεστεί το βήμα με $\delta t'$ που θα προκαλέσει:

$y = y_0$ (το βρ/χιο είναι ακριβώς στο έδαφος)

Στο σημείο αυτό υπολογίζεται η εφαπτομενική και η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στο έδαφος. Αν η γωνία κλίσης του εδάφους είναι θ , οι συνιστώσες αυτές είναι:

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

Κατά την πρόσκρουση απορροφάται μέρος της κινητικής ενέργειας λόγω ανελαστικής κρούσης. Κατά την επαπτομενική συνιστώσα, σημειώνεται «πέδηση», η φορά της ταχύτητας μένει αμετάβλητη ενώ το μέτρο απομειώνεται κατά συντελεστή k_s . Όταν ο συντελεστής απομείωσης (ή απόσβεσης) ισούται με την μονάδα η απορρόφηση ενέργειας είναι μηδενική ενώ όταν είναι μηδέν όλη η κινητική ενέργεια χάνεται. Κατά την κάθετη συνιστώσα, σημειώνεται κεντρική ανελαστική κρούση. Η απομείωση της κινητικής ενέργειας γίνεται βάση του συντελεστή k_n , ενώ κατά την απόδοση της αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας που παρέμεινε, η φορά της ταχύτητας αντιστρέφεται. Οι νέες ταχύτητες μετά την ανελαστική κρούση υπολογίζονται ως:

$$[u_s', u_n']^T = [k_s u_s, -k_n u_n]^T$$

Κατά το σύστημα x,y οι νέες ταχύτητες θα είναι:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s' \\ u_n' \end{bmatrix}$$

Έλεγχος αλλαγής κατάστασης

Ο έλεγχος αλλαγής κατάστασης, γίνεται σύμφωνα με την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας:

Αν $|u_n| > u_{\min}$, η προσομοίωση συνεχίζεται στην κατάσταση «1»

Αν $|u_n| < u_{\min}$, η προσομοίωση συνεχίζεται στην κατάσταση «2», κίνηση στο έδαφος. Τίθεται $u_n = 0$, υπολογίζονται εκ νέου τα u_x, u_y .

Κίνηση στο έδαφος

Η κίνηση στο έδαφος είναι μία επιταχυνόμενη γραμμική κίνηση, με αντίσταση (απώλειες). Η αντίσταση προέρχεται από τριβές ή από αντίσταση στην κύλιση. Η έκφραση της αντίστασης γίνεται μέσω ενός αδιάστατου συντελεστή f . Αν N είναι η κάθετη αντίδραση του εδάφους επί του βρ/χίου, η αντίσταση στην κίνηση ισούται με $f \cdot N$. Ο συντελεστής πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα από τον χρήστη, ανάλογα αν αναμένεται κύλιση ή ολίσθηση, σύμφωνα με την μορφή των βρ/χίων, την κλίση του εδάφους και τον συντελεστή τριβής σε ολίσθηση.

Εντοπισμός πλευράς

Αν $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ τότε γίνεται η κίνηση γίνεται στην πλευρά $i-i+1$

Υπολογίζεται η κλίση της πλευράς:

$$\lambda = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$$

η γωνία της κλίσης:

$$\theta = \tan^{-1}\lambda$$

Έλεγχος τερματισμού προσομοίωσης

Αν η κατάσταση είναι «2», η νόρμα της ταχύτητας είναι μικρότερη από την ελάχιστη ταχύτητα ($\sqrt{u_x^2 + u_y^2} < u_{\min}$) και ο συντελεστής αντίστασης είναι μεγαλύτερος από την κλίση του εδάφους ($f > |\lambda|$), τίθεται κατάσταση «0» (τερματισμός προσομοίωσης).

Κίνηση στο έδαφος

Η γραμμική επιταχυνόμενη κίνηση γίνεται σύμφωνα με τις συνιστώσες της επιτάχυνσης a_x, a_y .

$$a_x = -g \sin\theta \cos\theta - g \cos\theta \cos\theta f \langle s \rangle$$

$$a_y = -g \sin\theta \sin\theta - g \cos\theta \sin\theta f \langle s \rangle$$

Ο συντελεστής $\langle s \rangle$ είναι ίσος με:

$$1 \text{ όταν } u_x > 0$$

$$-1 \text{ όταν } u_x < 0$$

$$0 \text{ όταν } u_x = 0$$

Η νέα ταχύτητα υπολογίζεται από την σχέση:

$$[u_x, u_y]^T = [u_x + a_x \delta t, u_y + a_y \delta t]^T$$

ενώ η νέα θέση:

$$[x, y]^T = [x + u_x \delta t + \frac{1}{2} a_x \delta t^2, y + u_y \delta t + \frac{1}{2} a_y \delta t^2]^T$$

Επειδή σε ορισμένες καταστάσεις δεν είναι αποδεκτή η αντεπιστροφή, πρέπει να εκτελείται έλεγχος εάν η νέα και παλιά συνιστώσα u_x είναι ομόσημες. Στην περίπτωση που είναι ετερόσημες, οι παραπάνω υπολογισμοί δεν γίνονται με δt αλλά με:

$$\delta t' = -u_x/a_x$$

Έλεγχος αλλαγής κατάστασης

Γίνεται έλεγχος αν η νέα θέση x είναι μεταξύ της τρέχουσας πλευράς $i-i+1$:

$$x_i \leq x \leq x_{i+1}$$

Αν είναι, συνεχίζεται η προσομοίωση στην κατάσταση «2»

Αν είναι εκτός ορίων, υπολογίζεται το κατάλληλο $\delta t'$, ώστε το βρ/χιο να βρεθεί στο όριο και η κατάσταση αλλάζει σε «1», ώστε στον επόμενο κύκλο να πραγματοποιηθεί κίνηση στο κενό ή πρόσκρουση, ανάλογα την μορφολογία του εδάφους.

Επιπλέον έλεγχοι τερματισμού

Στην περίπτωση που το βρ/χιο βρεθεί εκτός των ορίων του εδάφους, η προσομοίωση τερματίζεται.

Στην περίπτωση που ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης υπερβεί τα 40 sec, η προσομοίωση τερματίζεται καθώς μπορεί να έχει προκληθεί αριθμητική αστάθεια.

Τέλος στην περίπτωση κίνησης πάνω στο έδαφος σε κοιλότητα μορφής V, η προσομοίωση τερματίζεται για να αποφευχθεί ατέρμων βρόγχος.