

# NOȚIUNI GENERALE PRIVIND SIGURANȚA CONTRA DERAIERII

Asist.dr.ing Luisa-Izabel DUNGAN  
Universitatea „Politehnica” din Timișoara

Absolventă a specializărilor MF și MRCF,  
Facultatea de Mecanică a Universității „Politehnica” din Timișoara  
Este doctor inginer în științe tehnice din 2008



**REZUMAT.** În lucrare sunt prezentate noțiunile generale privind siguranța contra deraierii, studiului acestora putând fi făcut pe cale grafică sau analitică.

**Cuvinte cheie:** contact roată-șină, limită de deraiere, torsionarea căii, diagrama de deraiere

**ABSTRACT.** In this work are presented general notes of safety against derailment, the study against these problems could be made by graphic or analytic method.

**Keywords:** wheel-rail contact, derailment limit, rail torsion, derailment diagram.

## 1. INTRODUCERE

Studiul și cunoașterea în amănunt a fenomenelor complexe din zona de contact roată șină constituie de fapt problema fundamentală care asigură dezvoltarea mijloacelor de transport feroviar.

Vehiculele de cale ferată sunt caracterizate de faptul că se deplasează prin intermediul roților osiilor pe calea de rulare și se autoghidează prin forțele de contact dintre buza bandajului roții și șine. Ca urmare roțile, pe lângă cele trei funcții obișnuite pe care le au și pentru alte mijloace de transport terestre, adică sprijinirea pe verticală a vehiculului, rularea pe cale și propulsia, respectiv frânarea, la vehiculele feroviare au o funcție în plus specifică acestora și anume aceea de autoghidare în interiorul celor două fire ale căii ferate. Fiind metalice, roțile, ca și șinele, oferă vehiculului feroviar capacitatea de a suporta sarcini mult mai mari decât la alte mijloace de transport terestru. Această capacitate, asociată cu aceea de autoghidare, creează posibilitatea formării convoaielor de vehicule (de trenuri) de mare tonaj, ceea ce conferă sistemului roată-șină avantajele unei capacități mari de transport.

În plus, rezistențele specifice la înaintare au valori reduse, datorită rostogolirii roților pe șine, fapt ce determină și un consum specific de energie pe tona transportată mult mai mic decât la toate celelalte sisteme de transport terestre.

Totodată, aptitudinea de autoghidare oferă vehiculelor feroviare capacitatea de a circula cu vitezele cerute de exploatare într-o siguranță deplină și aproape independent de starea atmosferică și de anotimpuri.

## 2. NOȚIUNI GENERALE PRIVIND SIGURANȚA ÎMPOTRIVA DERAIERII

În timpul circulației pe calea ferată, vehiculele feroviare sunt supuse acțiunii unor perturbații generatoare de oscilații care au efecte nefavorabile asupra calității de mers și care pot periclita siguranța ghidării vehiculului pe calea ferată. Totodată apar forțe dinamice de valori mari la contactul roată-șină, care produc deformări în domeniul plastic, refulări de material, microfisuri și exfolieri și care în final modifică forma suprafețelor de rulare afectând capacitatea geometrică de ghidare a buzei bandajului roții (suprafeței de rulare). Dimensiunile și forma zonei de contact roată-șină determină și fiabilitatea roților și a șinelor precum și caracteristicile de aderență în regim de tracțiune sau frânare a vehiculului.

După cum a arătat Prud`Homme în lucrarea publicată în 1970 în « Revue Generale de Chemins de Fer », defectele căii cu lungimi de undă mici produc supra-sarcini dinamice de valori mari care acționează asupra căii, mai ales la viteze mari de circulație. Lungimile de undă cele mai mici sunt chiar cele date de deformațiile elastice ale suprafețelor de contact. Pentru reducerea valorilor suprasarcinilor dinamice este necesar ca masele nesuspendate ale vehiculelor feroviare să fie cât mai mici posibil. În plus oscilațiile verticale ale osiilor pot produce micșorarea sarcinii verticale  $Q_0$  pe roata atacantă a osiei conducătoare și deci pot produce și creșterea valorii raportului  $Y1/Q_0$  de la această osie, care poate depăși valoarea limită impusă de condițiile de siguranță contra deraierii.

Suspensia vehiculelor feroviare trebuie să asigure o comportare dinamică stabilă la circulația vehiculelor în aliniament și în curbe, precum și limitarea și menținerea în limite acceptabile a forțelor de interacțiune cu calea de rulare. Cel mai important lucru privind suspensia este ca elementele elastice și de amortizare din ansamblul suspensiei să fie adaptate în mod optim condițiilor impuse de calea de rulare, de regimul de mers al vehiculului etc.

Fenomenul de torsionare al căii de rulare conduce la o repartizare inegală a sarcinilor verticale pe roțile vehiculului, dacă roata cea mai descărcată este și roată atacantă, aceasta poate să deraieze atunci când osia respectivă depășește limita capacității sale de ghidare (raportul  $Y/Q_a$ ). Totodată capacitatea de torsionare a vehiculului feroviar trebuie să asigure adaptabilitatea acestuia la descărcarea roții atacante, adică la torsionările căii. Ca urmare, între torsionarea căii și capacitatea de torsionare a vehiculului trebuie să existe o interdependență bine determinată prin care să se asigure în primul rând siguranța circulației și totodată suprasarcinile dinamice pe care le generează să devină cât mai puțin agresive sau periculoase pentru vehicul și cale.

La creșterea vitezelor de mers prin curbe, descărcările roții atacante sunt micșorate prin acțiunea forțelor centrifuge necompensate și prin urmare scade importanța torsionării căii din punct de vedere al siguranței circulației. În schimb crește importanța vitezei de variație a pantei de torsionare, fapt ce generează suprasarcini dinamice și care la rândul lor (în funcție de frecvența de apariție pe linie), contribuie la degradarea prematură a căii și a vehiculelor prin efectul solicitărilor la oboseală.

Trebuie menționat că așa numita „rulare pură”, fără alunecări, nu poate fi realizată în practică. Datorită alunecărilor longitudinale, în funcție de frecvență, în sensul curbelor, suprafața de rulare a roții se uzează de regulă în sensul creșterii valorii conicității, ceea ce are o influență nefavorabilă la circulația în aliniament. Pe lângă uzura anormală, alunecările longitudinale mai generează căldură și zgomot și necesită și un consum suplimentar de energie. Trebuie menționat că prin rulare conică alunecările longitudinale din zona de contact roată-șină pot fi înlăturate. Alunecările transversale din zona de contact roată-șină sunt dependente de unghiul de atac al osiei, iar orientarea spațială a osiei conduce la anularea alunecărilor transversale. Dacă roțile osiei conducătoare au un profil de uzură, forțele de frecare longitudinală acționează în sensul micșorării unghiului de atac, orientând astfel osia spre poziția radială, la care forța tangențială transversală de frecare devine nulă. Această proprietate, la care se adaugă și

efectul de centrare sunt caracteristicile fundamentale ale osiilor orientabile.

Noua generație de boghiuri, cu performanțe sporite a apărut odată cu soluția indicată de H. Scheffel în lucrarea « Conception nouvelles relatives aux grandes vitesses », în revista « Rail International » în decembrie 1974. Acesta a prezentat concepția unui boghiu la care osiile sunt conjugate prin legături speciale tip bissel, elastice lateral și articulate la capete. Plasarea radială a osiei conducătoare la circulația în curbă antrenează și osia condusă spre o poziție radială și realizează o stabilizare a osiilor, sistemul elastic astfel obținut opunându-se deplasărilor transversale și unghiulare relative între cele două osii. Aceleași efecte se obțin și prin conjugarea osiilor cu bare așezate în cruce.

Forțele tangențiale de contact sunt determinate atât de mărimea zonei de contact roată-șină, zonă considerată ca fiind eliptică conform teoriei lui Hertz cât și de valoarea coeficienților de frecare. În secolele XIX și XX au fost elaborate o serie de teorii privind fenomenele din zona de contact roată-șină, toate cu scopul de a rezolva problemele privind interacțiunile și dependențele dintre roți și calea de rulare și de a îmbunătăți performanțele dinamice ale vehiculelor feroviare.

Astfel în anul 1926 Carter [S1, S2] elaborează o teorie bidimensională a contactului de rulare cu frecare, stabilind relația dintre pseudoalunecarea longitudinală și forța tangențială. Carter a considerat roata ca fiind un cilindru iar șina ca fiind o placă plană, astfel aproximând forma suprafeței de contact ca o bandă laterală dreptunghiulară.

În anul 1935 R. Levi [S1, S2] stabilește o expresie matematică ce exprimă dependența coeficientului de frecare de pseudoalunecare. Astfel alura curbei este hiperbolică de gradul I, iar la pseudoalunecări mici se poate considera liniară.

În 1958 Johnson [S1, S2] a extins teoria bidimensională a lui Carter la un caz tridimensional de contact a două sfere în care pseudoalunecările longitudinale și laterale sunt incluse, dar exclude alunecarea de spin.

În 1963 Halling, Haines și Ollerton [S1, S2] au elaborat aproximativ aceeași teorie cu privire la cazul contactului eliptic cu pseudoalunecare longitudinală. Zona de contact a fost divizată într-o serie de benzi paralele cu direcția de rostogolire și fiecare bandă a fost studiată prin extinderea teoriei bidimensionale a lui Carter.

În lucrarea sa de doctorat « On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction » susținută în 1967, Joost J. Kalker (1933-2006) a elaborat o teorie liniară a contactului roată-șină bazată pe

ipoteza lui De Parter, care sugera că în cazul pseudoalunecărilor foarte mici, zona de alunecare din pata de contact este foarte mică și ca urmare poate fi neglijată. În consecință se poate considera că zona de aderență acoperă întreaga zonă de contact roată-șină. Kalker a prezentat și o teorie empirică pentru a stabili relații între pseudoalunecările longitudinale și laterale și forța totală de pseudoalunecare în zona de contact.

O evoluție sintetică a teoriilor de contact roată-șină se prezintă în tabelul 1-1 și în figura 1-1.

*Tabelul 1. Caracteristicile principalelor teorii de contact roată-șină*

Autorul, anul	Dimensiuni	Forțe	Cinematica	Rezolvare
HERTZ, 1881	2	normale	statică	analitic
BOUSSINESQ, 1885		normale și tangențiale	rostogolire pură	
CARTER, 1926				
CATTANEO, 1938				
MINDLIN, 1949				
HAINES-OLLERTON, 1936	3			rostogolire cu alunecare
KALKER, 1967-1993				

Aceste teorii se disting prin :

- numărul de dimensiuni geometrice luate în considerare: 2 sau 3;
- forțele ce acționează în zona de contact roată-șină: normale sau tangențiale ;
- cinematica: statică, rostogolire pură sau rostogolire cu alunecare;
- modul de rezolvare: analitic sau numeric.

Lămurirea problemei coeficienților de frecare din zona de contact roată-șină este foarte importantă pentru asigurarea aderenței roată-șină și îmbunătățirea performanțelor de tracțiune și frânare ale vehiculelor la limita de aderență.

În cazul vehiculelor feroviare motoare forța de tracțiune maximă ce se poate dezvolta la demaraj, la periferia roților motoare, fără a produce rostogolirea cu patinare, este chiar forța de aderență care scade odată cu creșterea vitezei de mers. Pe de altă parte rezistența la înaintare a trenului crește cu viteza, în special datorită rezistențelor aerodinamice care devin preponderante la viteze mari. Egalitatea acestor două forțe va determina viteza maximă de circulație a vehiculului motor. În cazul rostogolirii roților motoare cu patinare, acest fenomen de patinare a roților este însoțită de o mișcare sacadată de stick-slip care are efecte negative asupra

sistemului mecanic de antrenare al osiei, prin solicitările mecanice de valori mari ce se produc și totodată scad performanțele de tracțiune ale vehiculului.

Deoarece roțile sunt montate rigid pe osie iar conicitățile suprafețelor de rulare ale celor două roți sunt inversate, osia montată va executa în timpul circulației pe cale o mișcare de șerpuire. În cazul circulației normale în aliniament, dacă roțile au un profil de uzură, ghidarea osiei se va realiza pe suprafețele de rulare, iar buzele bandajelor, în această situație constituie un supliment de siguranță. Odată cu creșterea vitezei de mers vor lua naștere forțe de inerție, care, de îndată ce devin mai mari decât forța maximă transmisibilă prin frecarea roată-șină generează alunecarea transversală a osiei montate și preluarea funcției de ghidare de către buza bandajului.

Acest fenomen, care caracterizează o mișcare de șerpuire instabilă produce solicitări transversale inadmisibile ale căii de rulare și periclitează siguranța circulației.

Mișcările de șerpuire ale osiilor se transmit boghiului și mai departe cutiei vehiculului. Dacă se realizează un cuplu de frecare între boghiu și cutie, atunci acesta va contribui la reducerea mișcării de șerpuire, dar în schimb va produce o creștere a eforturilor transversale exercitate asupra căii la circulația în curbă, fapt ce limitează valoarea maximă a acestui cuplu de frecare.

Impunând sistemului mecanic format din cutia vehiculului și arcurile suspensiei centrale frecvența propriei suficient de coborâte în raport cu frecvența mișcării de șerpuire a boghiului, se obține o reducere a efectelor de șerpuire și se elimină riscul apariției fenomenului de rezonanță la viteze mari de mers.

Un rol important în lărgirea domeniului de stabilitate la șerpuire, din realizarea vitezei critice de mers cât mai mari îl au elasticitatea longitudinală și transversală a suspensiei osiilor. La viteze mari de mers s-a dovedit a fi avantajoasă conducerea elastică a osiilor care, după cum s-a mai arătat, creează și posibilitatea ca acestea să se orienteze spre o poziție radială la circulația în curbă a vehiculului. În cazul noilor generații de boghiuri cu osii conjugate sunt îndeplinite atât condițiile unui bun comportament la șerpuire în aliniament cât și de mărire a performanțelor vehiculelor de trecere prin curbe.

### **3. SIGURANȚA CONTRA DERAIERII LA LOCOMOTIVELE CU PIVOT FICTIV**

La un vehicul feroviar siguranța contra deraierii este determinată de capacitatea de ghidare a osiei conducătoare, care reprezintă forța maximă de ghidare pe roata atacantă la limita de deraiere,  $H_{max}$

Din condițiile de echilibru transversal rezultă că forța  $H$  este egală cu:

în condiții cvasistatice: suma vectorială a forțelor de ghidare  $Y_1$  și  $Y_2$  de pe cele două roți;

$$\bar{H} = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 \quad (1)$$

în condiții dinamice: la valoarea lui  $H$  trebuie să se adauge și rezistența transversală de inerție a osiei ( $m_o \ddot{y}$ ):

$$\bar{H} - m_o \ddot{y} = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2, \quad (2)$$

unde:  $m_o$  reprezintă masa osiei propriu-zisă, la care se adaugă masele tuturor elementelor solidare cu osia;

$\ddot{y}$  – accelerația transversală a osiei.

La vehiculele motoare valoarea acestei forțe de inerție este apreciabilă din cauza motoarelor de tracțiune și a dispozitivelor de antrenare.

Forța  $H$  are o importanță decisivă în siguranța contra deripării căii și are ca efect solocitarea organelor de rulare a vehiculelor. Din această cauză a rezultat și necesitatea de a limita valorile forței  $H$ .

Pentru menajarea organelor de rulare a vehiculelor se prevăd valori limită atât pentru forța transversală maximă  $H_{max}$ , cât și pentru cea medie  $H_{med}$ , respectiv:

$$H_{max} \leq 0.4 \cdot 2 \cdot Q_o \quad (3)$$

$$H_{med} \leq 0.25 \cdot 2 \cdot Q_o \quad (4)$$

În cazul bicontactului roții atacante cu șina, creșterea forței de ghidare  $Y_1$  face să crească în punctul de ghidare 1 reacțiunea  $N_1$  și, în consecință, va crește și acțiunea descrescătoare a componentei  $T_{1yz}$  a forței de

frecare, din care cauză se micșorează reacțiunea  $N_1$  în punctul de sprijin  $A_1$  [S1].

Situația în care se ajunge la la  $N_1 = 0$ , când punctul de sprijin  $I$  este complet descărcat și sarcina  $Q_1$  de pe roata atacantă trece în întregime pe buza de ghidare a roții în punctul 1, se numește *limită de stabilitate la deraiere sau limită de deraiere*

Dacă forța  $Y_1$  va crește în continuare, față de situația de mai sus, buza roții conducătoare se va urca pe flancul interior al șinei, producându-se deraierea.

În cazul monocontactului, se consideră că s-a ajuns la limita de deraiere atunci când punctul unic de contact a ajuns pe buză la un unghi de flanc maxim.

La limita de deraiere, din poligonul forțelor (fig. 2), în cazul unei osii conducătoare la care roata atacantă rulează în bicontact cu șina [S1]. Putem scrie:

$$Y_1 = N_1 \cdot \sin \gamma_1 - T_{1yz} \cdot \cos \gamma_1 + N_1' \cdot \sin \gamma_1' - T_{1yz} \cos \gamma_1' \quad (5)$$

$$Q_1 = N_1 \cdot \cos \gamma_1 + T_{1yz} \cdot \sin \gamma_1 + N_1' \cdot \cos \gamma_1' + T_{1yz} \sin \gamma_1' \quad (6)$$

rezultă raportul  $\left(\frac{Y_1}{Q_1}\right)_{lim}$ .

Pentru  $N_1 = 0$  și notând cu  $tg \delta_1 = \frac{T_{1yz}}{N_1} = \mu_1 \cos \xi_1$ ,

făcând iterațiile corespunzătoare obținem:

$$\left(\frac{Y_1}{Q_1}\right)_{lim} = \frac{tg \gamma_1 - \mu \cos \xi_1}{1 + \mu \cos \xi_1 \cdot tg \gamma_1} \quad (7)$$

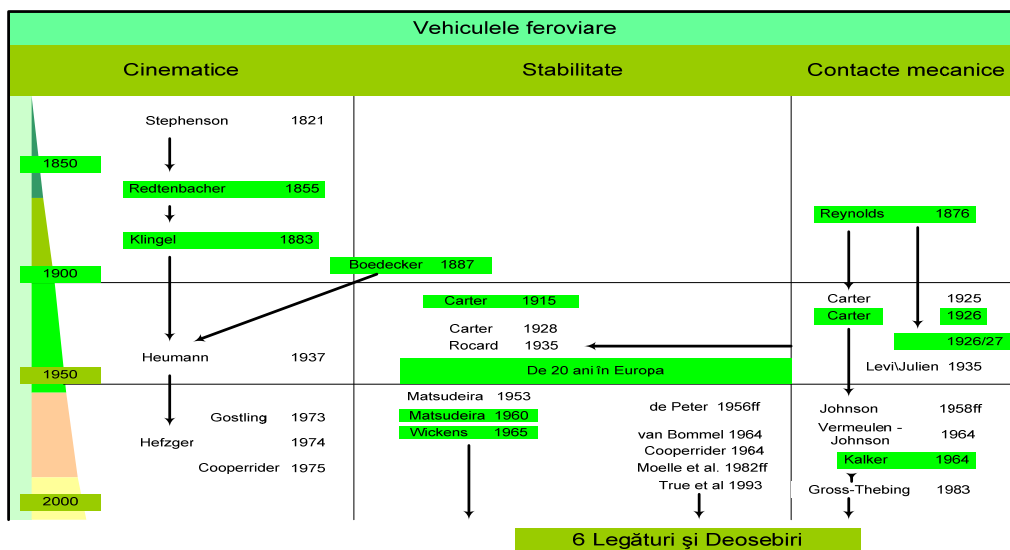


Fig. 1. Evoluția sintetică a teoriilor de contact roată-șină.

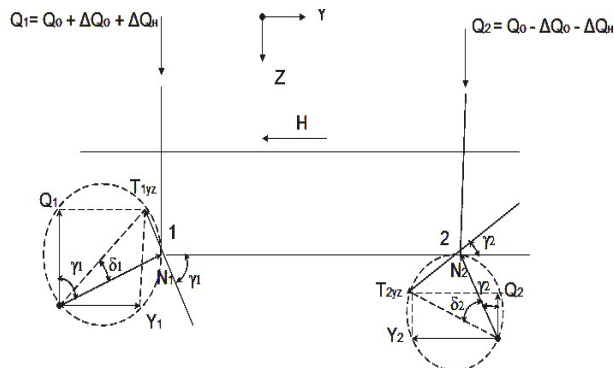


Fig. 2. Forțele de contact ale osiei cu calea considerate în studiul siguranței contra deraierii.

Din această relație se observă că capacitatea de ghidare este influențată de mărimea lui  $\cos \xi_1$  care depinde de:

- regimul de lucru al osiei;
- unghiul de atac  $\alpha$ .

Situația cea mai defavorabilă este atunci când  $\cos \xi_1 = 1$ , adică situația osiei libere, caz în care relația (7) devine:

$$\left(\frac{Y_1}{Q_1}\right)_{\text{lim}} = \frac{\text{tg} \gamma_1 - \mu}{1 + \mu \cdot \text{tg} \gamma_1} \quad (8)$$

În literatura de specialitate [N1] această relație este cunoscută sub denumirea de formula lui Nadal.

Din modul de deducere al acestei formule se observă că nu s-a ținut seama de dependența care există între sarcina pe roată și forța de ghidare și nici de influența efectului de spin în punctul de contact de pe buză asupra coeficientului de frecare.

Lucrările Comitetului ORE B55 [\*\*\*\*\*1] au arătat că, pentru a se evita deraierea vehiculului în linie curentă, raportul  $\frac{Y_1}{Q_1}$  trebuie să fie inferior valorii limită  $\left(\frac{Y_1}{Q_1}\right)_{\text{lim}} =$

$= 0,85$  pentru unghiul  $\gamma_1=60^\circ$  respectiv  $\left(\frac{Y_1}{Q_1}\right)_{\text{lim}} = 1,2$  pentru unghiul  $\gamma_1=70^\circ$ .

#### 4. SIGURANȚA LA DERAIERE SUB INFLUENȚA FORȚELOR EXTERIOARE

Studiul siguranței la deraiere sub influența forțelor exterioare se poate realiza în două moduri și anume:

- pe cale analitică, atunci când se calculează:

a) valorile limită de deraiere ale raportului dintre forța transversală  $H$  și sarcina medie pe roată  $Q_o$  în

funcție de coeficientul  $\frac{\Delta Q_o}{Q_o}$ , cu care se află într-o dependență liniară

$$\left(\frac{H}{Q_o}\right)_{\text{lim}} = \frac{[\text{tg}(\gamma_1 - \delta_1) - \text{tg}(\gamma_2 + \delta_2)] + \frac{\Delta Q_o}{Q_o} [\text{tg}(\gamma_1 - \delta_1) + \text{tg}(\gamma_2 + \delta_2)]}{1 - \frac{\lambda \cdot r}{2s} [\text{tg}(\gamma_1 - \delta_1) + \text{tg}(\gamma_2 + \delta_2)]} \quad (9)$$

b) coeficientul de transfer limită corespunzând descărcării roții atacante (când se cunoaște valoarea lui  $H$ ), valoarea minimă a acestuia fiind dată de Comitetul ORE B55 [\*\*\*\*\* 1], funcție de valoarea lui  $Y_1$  calculată sau măsurată :

$$\left(\frac{\Delta Q_o}{Q_o}\right)_{\text{lim}} = \left[ \frac{\lambda \cdot r \cdot H}{2s \cdot Q_o} + \frac{\text{tg}(\gamma_1 - \delta_1) - \text{tg}(\gamma_2 + \delta_2) - \frac{H_o}{Q_o}}{\text{tg}(\gamma_1 - \delta_1) + \text{tg}(\gamma_2 + \delta_2)} \right] \text{ sau}$$

$$\left(\frac{\Delta Q_o}{Q_o}\right)_{\text{lim}} = \left[ \frac{\text{tg}(\gamma_1 - \delta_1) - \frac{Y_1}{Q_o}}{\text{tg}(\gamma_1 - \delta_1)} \right] \quad (10)$$

c) capacitatea de ghidare a osiei:

$$(Y_1)_{\text{lim}} = \frac{2Q_o \text{tg}(\gamma_2 + \delta_2) - (Q_o + \Delta Q_o) \frac{2s}{\lambda \cdot r}}{1 - \text{ctg}(\gamma_1 - \delta_1) \left[ \frac{2s}{\lambda \cdot r} - \text{tg}(\gamma_2 + \delta_2) \right]} \quad (11)$$

d) valorile la limita de deraiere a forței de ghidare  $Y_1$  raportată la sarcina medie pe roată  $Q_o$ , funcție de coeficientul de transfer  $\frac{\Delta Q_o}{Q_o}$ .

$$\left(\frac{Y_1}{Q_o}\right)_{\text{lim}} = \left(1 + \frac{\Delta Q_o}{Q_o}\right) \text{tg}(\gamma_1 - \delta_1) \quad (12)$$

• pe cale grafică, construind diagrama de deraiere (fig. 3). Această metodă prezintă avantajul că în diagrama de deraiere care se construiește, influența forțelor exterioare este mai vizibilă decât în calcul analitic.

#### 5. CONCLUZII

La proiectarea unui vehicul feroviar nou, respectiv la modernizarea unuia mai vechi, trebuie studiate în profunzime problemele legate de siguranța contra deraierii. Proiectanții de VF studiază siguranța contra deraierii prin metoda grafică, deoarece are avantajul că în diagrama de deraiere care se construiește, influența forțelor

exterioare este mai vizibilă decât în calcul analitic. Rezultatele obținute prin această metodă sunt comparate cu rezultatele obținute prin măsurători la circulația pe cale a vehiculului feroviar studiat.

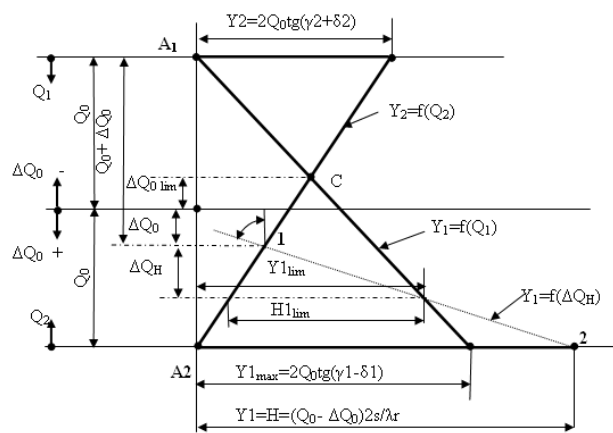


Fig. 3. Diagrama de deraiere.

## BIBLIOGRAFIE

- [D1] Luisa Dungan, *Contribuții la studiul și cercetarea comportării arcurilor de tip flexicoil de la locomotive electrică CFR 060-EA de 5100 kW*, Editura POLITEHNICA, 2008, ISBN:978-973-625-599-1;
- [S1] I. Sebeșan, *Dinamica vehiculelor de cale ferată*, Ed. Tehnică București, 1995;
- [S2] Ș. Sebeșan, *Siguranța contra deraierii la vehicule de cale ferată*, Revista Căilor ferate, 7, 1961;
- [\*\*\*\*\*1] ORE B55 RP1, Recomandations relatives aux dispositifs de mesure les plus convenables et aux tolerances admissibles.