

Biomecanica sistemelor radiculare ale arborilor forestieri

Francisc Grudnicki

1. Considerații generale

Biomecanica este știința care aplică legile și raționamentele specifice mecanicii în studiul biosferei, de la celule, țesuturi, organe și organisme până la populații și ecosisteme. Ca simbioză a două discipline fundamentale ale cunoașterii umane, biomecanica este știință pură și știință aplicată, studiind aspectele fundamentale ale fenomenelor mecanice a materiei vii.

Preocupările biomecanicii, deși cu o vechime de peste 100 de ani, s-au impus în ultimii 20-30 de ani. În această perioadă, biomecanica s-a diversificat în mai multe subdomenii, dintre acestea, biomecanica forestieră fiind biomecanica aplicată în domeniul forestier.

Scopul biomecanicii constă în elaborarea modelelor matematice necesare studierii fenomenelor mecanice a materiei vii. În acest context este abordată și biomecanica sistemelor radiculare ale arborilor forestieri, de care depinde stabilitatea arborilor și a arboretelor.

2. Arborii forestieri - structuri biomecanice optime

Arborii forestieri sunt organisme cu țesuturi vii, fapt ce le deosebește de celelalte

materiale, datorită capacității lor de a crește.

Prin creștere, țesutul arborilor își modifică în permanență dimensiunile și proprietățile biomecanice. Aceste modificări sunt determinate de solicitările externe și de procesele biochimice, care în timp schimbă atât țesutul viu, cât și câmpurile de tensiuni - ca proprietăți esențiale ale vieții.

În condițiile de mediu date, natura are capacitatea de a crea biostructuri optime, capabile să asigure în tot timpul existenței lor, cerințele biologice și mecanice. Forma arborilor forestieri, prin structura componentelor (rădăcină, trunchi, coronă) variază de la specie la specie și de la individ la individ.

Forma naturală a acestor structuri impune ca model matematic de studiu forma unui corp de rotație, care rezultă din rotația în jurul unei axe verticale a unei curbe generatrice geometrice sau biomecanice.

Această formă, pe lângă alte multiple elemente biologice și mecanice, demonstrează și confirmă faptul că arborii forestieri sunt structuri biomecanice optime.

3. Sistemele radiculare ale arborilor forestieri.

Totalitatea rădăcinilor constituie modul de înrădăcinare sau sistemul de înrădă-

cinare, care diferă de la specie la specie.

Se cunoaște că, după gradul de dezvoltare a rădăcinii principale, în raport cu rădăcinile laterale se deosebesc trei sisteme de înrădăcinare: pivotantă sau profundă (brad, stejar), trasantă sau superficială (molid) și pivotant-trasantă (larice, fag, carpen, pal-tin).

Sistemul de înrădăcinare variază cu vârsta, proprietățile fizice ale solului (profundime, compactitate, umezeală etc.), cu bonitatea solului etc. Sistemul de înrădăcinare împreună cu terenul (solul) aferent constituie sistemul radicular.

Dimensiunile sistemelor radiculare variază în timp și spațiu, un exemplu fiind arborele *Sequoia gigantea*, care ajunge la o înălțime de 120 m, un diametru de bază de 10 m, rădăcini până la o adâncime de 3,50 m și pe o rază de 27 m.

Principalele funcții biologice ale sistemului radicular sunt: absorbția apei cu substanțele nutritive din sol care sunt transmise trunchiului și coroanei, raporturile de simbioză cu microorganismele, contribuția la regenerarea vegetală, prin muguri aderenți, drajoni sau butași de rădăcină.

Principalele funcțiuni mecanice ale sistemului radicular sunt: fixarea arborilor în teren, transmiterea în teren a solicitărilor mecanice la care este supus arborele, asigurarea stabilității arborelui la solicitările mecanice

4. Structura biomecanică a sistemului radicular.

Din punct de vedere biomecanic arborele forestier este format dintr-o fundație formată din biomasa rădăcinilor și terenul (solul) aferent, adică sistemul radicular al arborelui, elevație formată din biomasa trunchiului și coroanei, care se consideră încastrată în fundație (sistemul radicular).

Fundația arborelui forestier (rădăcinile

și solul aferent) are o structură deosebit de complexă, având următoarele caracteristici principale:

a. sistemul radicular este un organism viu care își schimbă dimensiunile;

b. rădăcinile formează spațial o rețea foarte complexă de armare a terenului și de ancorare în acesta;

c. rețeaua de armare și de ancorare are dimensiuni variabile, secțiunile transversale fiind circulare, diametrul lor mic orându-se substanțial spre extremități, fapt ce facilitează penetrarea rețelei în teren și ancorarea în acesta.

d. natura este prima care a creat fundații armate prin sistemele de înrădăcinare ale plantelor, ceea ce confirmă în plus că arborii sunt structuri biomecanice optime.

Rezultă în mod evident că fundațiile arborilor forestieri satisfac toate dezideratele asigurării stabilității acestora.

5. Modelul biomecanic al sistemelor radiculare

5.1. Structura biomecanică a sistemului radicular

Așa cum pentru elevația arborilor forestieri modelul biomecanic adoptat este cel al corpurilor de rotație, de asemenea, și pentru fundația arborilor (rădăcinile și terenul aferent), modelul biomecanic este cel al corpurilor de rotație.

Astfel, pentru înrădăcinarea pivotantă modelul poate fi un con (fig. 5.1.a) sau un paraboloid, la care raza proiecției orizontale b a sistemului radicular la nivelul solului, este mult mai mică decât adâncimea acestui sistem ($b < a$).

Pentru înrădăcinarea trasantă modelul poate fi un cilindru (fig. 5.1.b) sau un trunchi de con, la care b este mult mai mare decât a ($b > a$), în timp ce pentru înrădăcinarea pivotant trasantă, modelul poate fi o

semisferă (fig. 5.1.c), un cilindru sau un trunchi de con, la care b este egal cu a ($b = a$).

5.2. Greutatea proprie a sistemului radiceleare

Greutatea fundației G , depinde de proporția greutatei biomasei sistemului radiceleare G_b și a greutatei terenului aferent G_t :

$$G = G_b + G_t \tag{5.1}$$

Greutatea biomasei rădăcinilor G_b este:

$$G_b = \rho_b g V_b = \gamma_b V_b \tag{5.2}$$

unde ρ_b - densitatea specifică a rădăcinilor V_b - volumul acestora, iar γ_b - greutatea specifică.

Dacă notăm cu V_e volumul biomasei e-

levației, volumul biomasei rădăcinilor este:

$$V_b = k_b V_e \tag{5.3}$$

unde $k_b < 1$ - coeficient care diferă de la specie la specie, în timp ce greutatea biomasei rădăcinilor G_b este:

$$G_b = k_b \gamma_b V_e \tag{5.4}$$

Greutatea aferentă terenului G_t este:

$$G_t = \tilde{n}_t g V_t = \tilde{a}_t V_t \tag{5.5}$$

unde ρ_t - densitatea specifică a terenului, V_t - volumul, iar γ_t - greutatea specifică.

Volumul terenului V_t rezultă din relația:

$$V_t = V - V_b = V - k_b V_e \tag{5.6}$$

unde V - volumul modelului biomecanic adoptat pentru fundație (sistemul radiceleare).

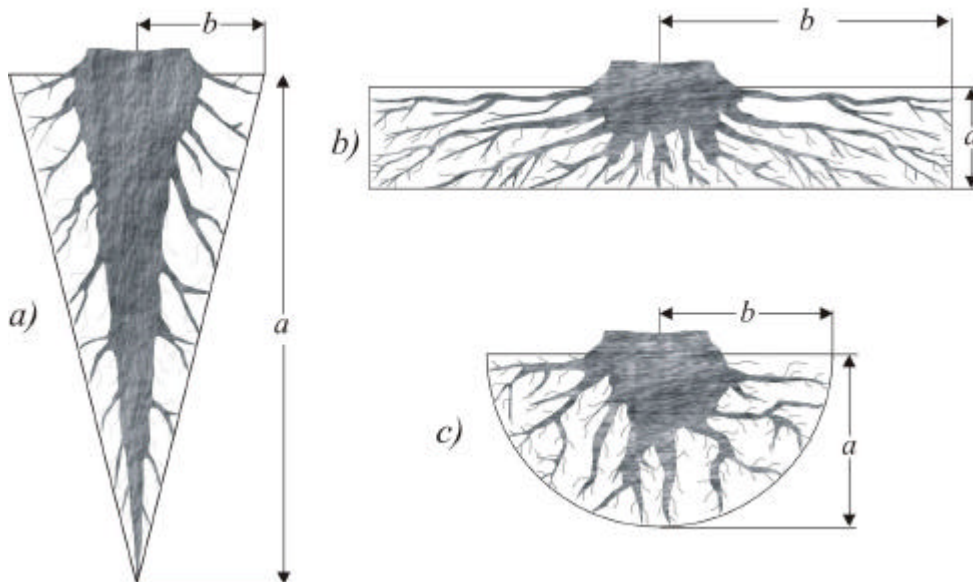


Fig. 5.1. Modele ale sistemelor radiceleare

Proporția de volum a rădăcinilor în raport cu volumul suprateran (V_e) este de 9 % la fag, 10 % la gorun, 11 % la molid și 8 % la brad (Giurgiu și Decei, 1997).

Greutatea aferentă terenului este, astfel:

$$G_t = \gamma_t (V - k_b V_e) \quad (5.7.)$$

Având în vedere relațiile de mai sus, greutatea fundației este:

$$G = G_b + G_t = \tilde{\alpha}_t V - k_b V_e (\tilde{\alpha}_t - \tilde{\alpha}_b) \quad (5.8)$$

În relația (5.8) toți parametrii sunt cuantificabili.

6. Sarcinile mecanice care solicită arborii

6.1. Sarcini mecanice exterioare

Sarcinile (forțele) exterioare (fig. 6.1.) care acționează asupra arborilor sunt constituite din:

a. sarcini (forțe) active permanente - greutatea proprie a elevației (trunchi plus coroană) și greutatea proprie a fundației (sistemul radicular);

b. sarcini (forțe) active nepermanente la elevație - forțe de presiune statică și dinamică datorită mișcării atmosferei (vânt), apei (inundații), zăpezii (avalanșe), greutatea precipitațiilor reținute de arbori, percuția arborilor în cădere;

c. sarcini (forțe) pasive (de legătură) la fundație: reacțiunile datorate portanței terenului, reacțiunile din ancorajul sistemului radicular;

Sarcinile exterioare au următoarele caracteristici:

a. sunt sarcini (forțe) neuniform distribuite;

b. mărimea (intensitatea) acestor forțe, direcția și sensul depind de curbele gene-

ratoare (de contur) adoptate pentru forma arborelui și de caracteristicile mediilor (densitate, viteză, etc.) luate în considerare și de coeficienți specifici.

Prin combinarea sarcinilor (forțelor) active se obțin diverse scheme de sarcini (scheme de forțe) de care depinde stabilitatea arborilor și a arboretelor.

Una din sarcinile active nepermanente de mare intensitate, este cea datorată vântului puternic, care duce la dezrădăcinarea și ruperea arborilor.

6.2. Sarcini mecanice interioare

Datorită acțiunii forțelor exterioare, în interiorul arborelui se produc eforturi secționale: forțe axiale (compresiune, întindere), forțe tăietoare, momente de încovoiere, momente de torsiune.

Deoarece modelul biomecanic al arborelui este corpul de rotație, iar rezultantele forțelor exterioare se află întotdeauna în planele de simetrie, solicitarea din arbore este compusă din compresiune și încovoiere (compresiunea excentrică).

Efectul solicitărilor constă în modificarea tensiunilor și a formei, arborele, care este un corp elastic și deformabil.

6.3. Schema generală de sarcini

În figura 6.1 este prezentată schema generală a rezultatelor sarcinilor care acționează asupra arborelui din planul vertical Oxy, axa Ox fiind axa de rotație a modelului biomecanic adoptat.

Rezultantele forțelor ce acționează asupra arborelui se descompun în componente orizontale și verticale.

Astfel, componenta orizontală R_o și componenta verticală R_v a rezultantei forțelor exterioare neuniform distribuite ce acționează asupra elevației sunt date de relațiile:

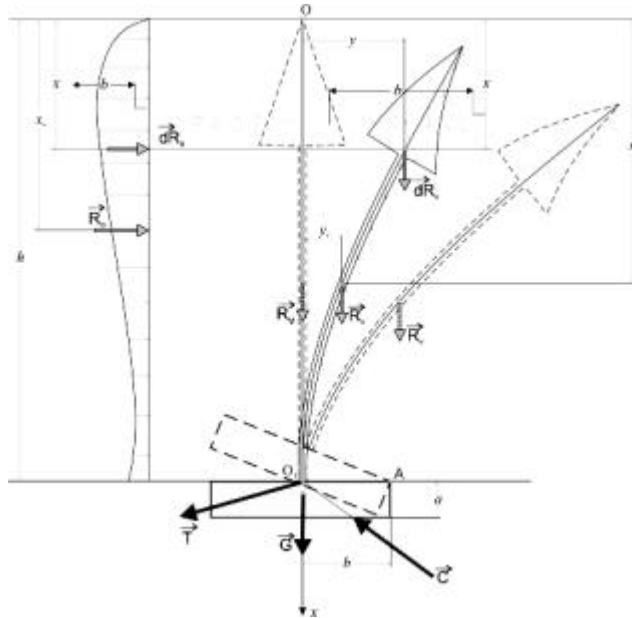


Fig. 6.1. Schema generală de sarcini exterioare

$$R_o = \int_0^h dR_o(x) \text{ și } R_v = \int_0^h dR_v(x) \quad (6.1)$$

unde $dR_o(x)$ și $dR_v(x)$ sunt forțele elementare orizontale, respectiv verticale.

Abscisele punctelor de aplicație x_o și x_v ale forțelor R_o respectiv R_v rezultă din aplicarea teoremei momentelor (teorema lui Varignon):

$$x_o = \frac{\int_0^h x dR_o(x)}{R_o}; \quad x_v = \frac{\int_0^h x dR_v(x)}{R_v} \quad (6.2)$$

Brațul de pârghie s al forței R_o în raport cu punctul de răsturnare A este:

$$s = h - x_o \quad (6.3)$$

Săgeata y_v corespunzătoare punctului de aplicație a forței R_v de pe axa deformată a elevației, rezultă din aplicarea ecuației diferențiale, pentru corpuri elastice omogene și izotrope, solicitate la încovoiere și compresiune:

$$EI(x) \frac{d^2 y}{dx^2} + yN(x) = -M(x) \quad (6.4)$$

unde: E - modulul lui Young, $I(x)$ - momentul de inerție geometric în secțiunea x , y_v - săgeata axei deformată în secțiunea x , $N(x)$ - forța de compresiune în secțiunea x , aferentă sarcinilor verticale și $M(x)$ - momentul de încovoiere în secțiunea x , aferent sarcinilor orizontale

Forțele neuniform distribuite pasive din sistemul radicular sunt reprezentate de rezultanta T a tracțiunilor ancorajelor și rezultanta C a compresiunilor terenului.

7. Solicitările din sistemele radiceleare

Acțiunea sarcinilor active este preluată de forțele pasive și eforturile secționale din sistemul radicelear.

Aceste forțe depind de forțele active și de starea de echilibru a elevației și fundației, respectiv a arborelui.

Datorită complexității structurii sistemului radicelear, a structurii forțelor pasive și a eforturilor secționale, care sunt foarte complexe, sistemul radicelear se poate asimila cu o fundație armată artificială.

7.1. Solicitările datorate forțelor active permanente

În această situație (fig. 7.1), asupra arborelui acționează numai propria sa greutate, formată din greutatea elevației G_e și greutatea fundației G .

În acest caz, arborele este în echilibru, fiind supus numai compresiunii centrice, adică încât tracțiunile din rădăcini sunt nule ($T = 0$), iar forțele elementare de com-

presiune sunt normale la suprafețele de contur și au o variație liniară.

Rezultanta forțelor de compresiune C este coliniară cu axa de simetrie și are mărimea:

$$C = G_e + G \tag{7.1.}$$

7.2. Solicitările datorate forțelor active permanente și nepermanente pentru arbore în echilibru

Asupra întregului arbore acționează în acesta caz, forțele R_0 și R_v (fig. 7.2) din elevație și greutatea sistemului radicelear G .

În cazul acestor solicitări active exterioare au loc o serie de manifestări. Astfel, sistemul radicelear (fundația) este în echilibru stabil (arborele nu este dezrădăcinat), adică momentul de stabilitate M_s (în raport cu punctul A) este mai mare ca momentul de răsturnare M_r (în raport cu punctul A), sau $M_s > M_r$. Arborele este supus la compresiune și încovoiere (compresiune excentrică). O parte din sistemului radicelear este

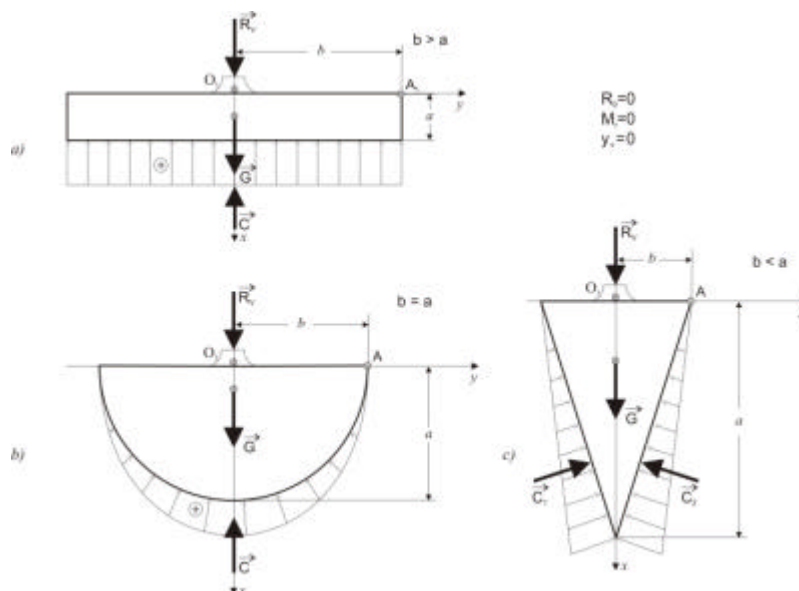


Fig. 7.1. Schema de sarcini sub acțiunea greutății proprii.

supus eforturilor de întindere care sunt preluate de rădăcini, cealaltă parte este solicitată la compresiune, pe care o preia terenul.

Datorită simetriei modelului biomecanic

adoptat, faptului că direcțiile rădăcinilor principale și ale rădăcinilor laterale converg în centrul cercului O_1 de la partea superioară a fundației și faptului că peste 70 % din volumul rădăcinilor se află concentrat

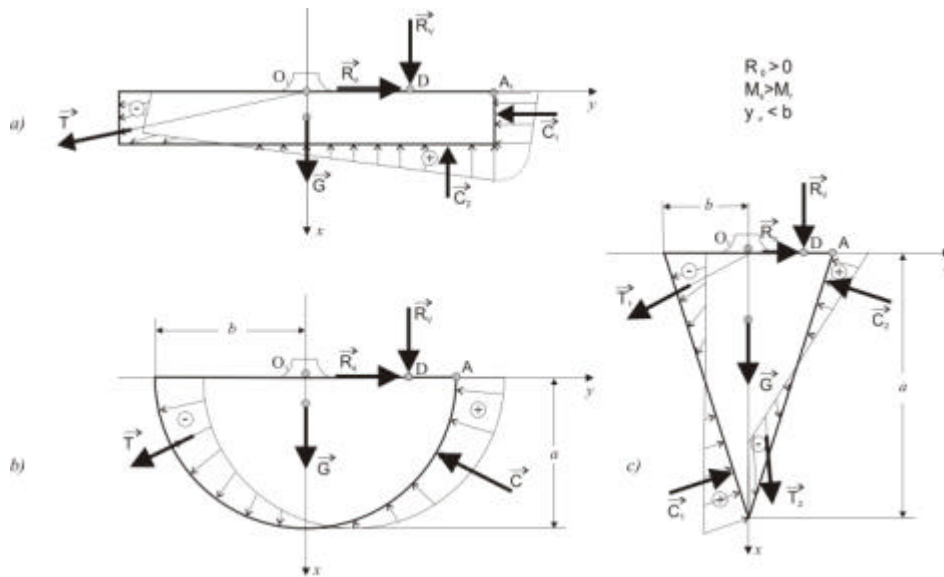


Fig. 7.2. Schema de sarcini sub acțiunea forțelor active

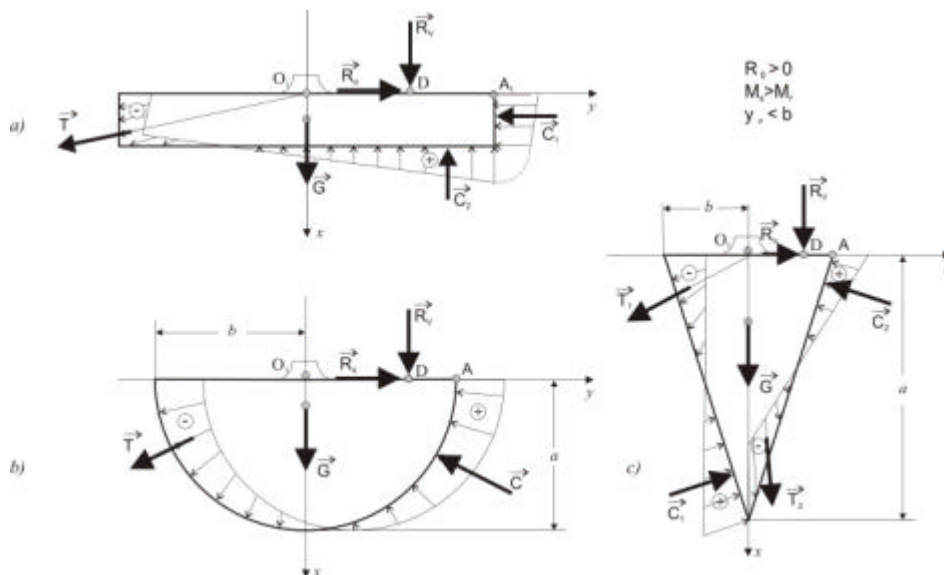


Fig. 7.2. Schema de sarcini sub acțiunea forțelor active

în sol, pe primii 40 cm adâncime (Giurgiu și Decei, 1997), este evident că și direcțiile forțelor elementare de tracțiune și direcția rezultantei lor T au aceeași direcție, fiind astfel oblice pe suprafețele de contur.

Forțele elementare de compresiune și rezultanta lor C au direcțiile normale pe suprafețele de contur. Se consideră o variație liniară a forțelor elementare de tracțiune și a forțelor elementare de compresiune pe suprafețele de contur aferente.

Direcțiile rezultatelor T și C trec prin centrele de greutate ale suprafețelor diagramelor forțelor elementare aferente acestor rezultante.

7.3. Solicitățile datorate forțelor active permanente și nepermanente pentru arbore la echilibru limită

Stabilitatea arborilor este limitată până în clipa când se produce dezrădăcinarea,

arborele fiind doborât (fig. 7.3).

Starea limită de echilibru se caracterizează prin următoarele:

- momentul de stabilitate M_s este egal cu momentul de răsturnare M_r , adică $M_s = M_r$;
- tracțiunile din rădăcinile ancore sunt repartizate pe toată suprafața de contur a sistemului radicular și au mărimea maximă egală cu tracțiunea de rupere cu efectul de dezrădăcinare. Rezultanta T a tracțiunilor devine:

$$T = T_{\max} = T_{\text{rupere}} \quad (7.2)$$

- punctul de aplicație al tracțiunii maxime T_{\max} se consideră centrul O_1 de pe axa de simetrie Ox și se poate descompune în componentele $T_{x\max}$ și $T_{y\max}$;
- compresiunile se concentrează în punctul A , considerat o articulație ancorată, în jurul căruia arborele se rotește în cădere. Rezultanta compresiunilor C are mărimi

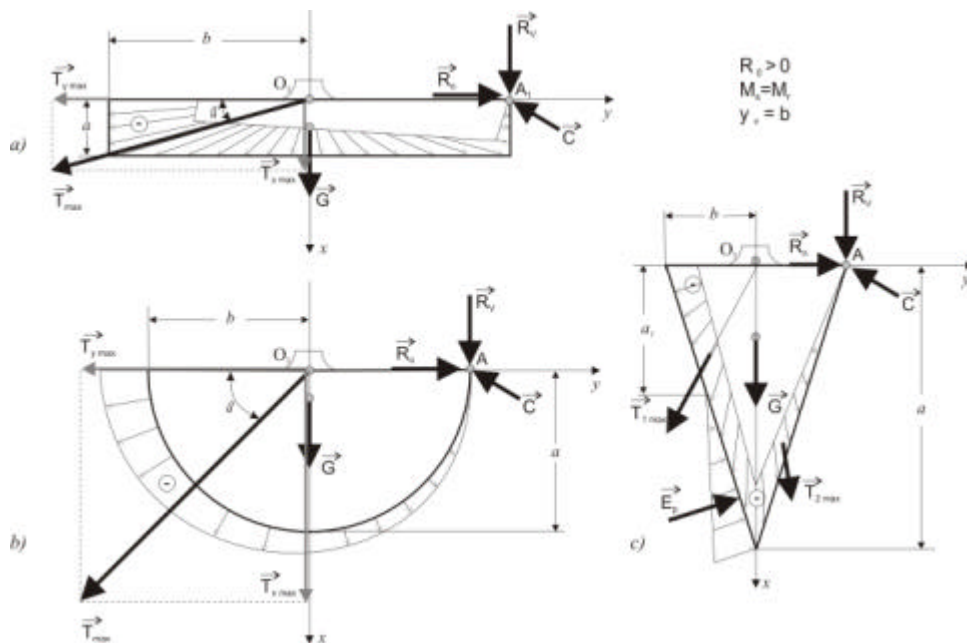


Fig. 7.3. Schema de sarcini la echilibru limită

variabile în funcție de poziția arborelui în cădere;

- în cazul sistemului radicele pivotant, pe o parte din suprafața de contur apare împingerea pasivă a pământului E_p (fig. 7.3.c), care este o forță stabilizatoare cuantificabilă și care contribuie la o stabilitate mare a acestui sistem de înrădăcinare.

Întrucât forțele active permanente și nepermanente sunt cuantificabile, tracțiunea maximă este, la rândul ei, cuantificabilă, aplicând condiția de echilibru limită, adică:

$$M_s = M_r \quad (7.3)$$

Ambele momente depind de mărimea săgeții y_v a punctului de aplicație a rezultantei R_v (fig. 6.1); astfel, pentru $y_v < b$ avem:

$$M_s = (T_x + G)b + R_v(b - y_v); M_r = R_o s \quad (7.4)$$

caz în care R_v este forță stabilizatoare, ce contribuie substanțial la stabilitate.

Pentru $y_v = b$ avem:

$$M_s = (T_x + G)b; M_r = R_o s \quad (7.5.)$$

caz în care R_v nu are nici un efect asupra stabilității, cazul fiind defavorabil față de cel precedent.

Situația $y_v > b$, este cea mai defavorabilă:

$$M_s = (T_x + G)b; M_r = R_o s + R_v(y_v - b) \quad (7.6)$$

deoarece forța R_v este o forță destabilizatoare. Din egalitatea $M_s = M_r$ aplicată relațiilor 7.4, 7.5 și 7.6 se obține $T_{x_{max}}$ care are expresiile:

$$T_{x_{max}} = \frac{1}{b} [R_o s - R_v(b - y_v) - Gb] \quad (7.7)$$

pentru $y_v < b$;

$$T_{x_{max}} = \frac{1}{b} (R_o s - Gb) \quad (7.8)$$

pentru $y_v = b$;

$$T_{x_{max}} = \frac{1}{b} [R_o s + R_v(y_v - b) - Gb] \quad (7.9)$$

pentru $y_v > b$.

Mărimile forțelor $T_{y_{max}}$ și T_{max} sunt:

$$T_{y_{max}} = T_{x_{max}} \operatorname{ctg} \alpha; T_{max} = \sqrt{T_{x_{max}}^2 + T_{y_{max}}^2} \quad (7.10)$$

Pentru înrădăcinarea trasantă se poate considera $\operatorname{ctg} \alpha = b/a$ (fig. 7.3.a), iar pentru înrădăcinarea pivotant-trasantă $\operatorname{ctg} \alpha = 1 - \alpha = 45^\circ$ (fig. 7.3.b)

Relația cea mai avantajoasă pentru calculul tracțiunii $T_{x_{max}}$ este relația (7.8), datorită faptului că se elimină din calcul săgeata axei deformată y_v

Pentru cuantificarea efectivă a tracțiunii maxime T_{max} din sistemul radicele, la echilibrul limită, cu relațiile sus menționate, există suficiente elemente și date dendrometrice, cât și aparatură modernă pentru efectuarea măsurătorilor necesare în parcelele cu doborâturi și rupturi de vânt și prelucrarea acestora pe calculator.

8. Stabilitatea sistemelor radicele

Stabilitatea sistemelor radicele, deci și a arborilor, este determinată de următoarele condiții:

a) momentul de stabilitate M_s (al forțelor stabilizatoare) trebuie să fie mai mare decât momentul de răsturnare M_r (al forțelor destabilizatoare), adică $M_s > M_r$;

b) tracțiunea T din ancorajul sistemului radicele trebuie să nu depășească tracțiunea de rupere $T_{maximum}$, adică $T < T_{max} = T_{rupere}$;

c) terenul să fie stabil.

În acest context rezultă că tracțiunea

maximă (tracțiunea de rupere) a ancorajului sistemului radicular reprezintă, din punct de vedere biomecanic, capacitatea de ancorare a sistemelor radiculare.

Se observă că forțele G și T sunt factori stabilizatori permanenți, de unde rezultă că greutatea proprie a sistemului radicular G și capacitatea de ancorare T_{max} a sistemului radicular sunt parametri biomecanici fundamentali de stabilitate ai arborilor forestieri. Acești parametri se modifică în spațiu și timp și depind de factorii staționali și, în special, de proprietățile fizice ale solului, dintre care umiditatea are un rol esențial. Se cunoaște că arborii cu înrădăcinare trasantă sunt instabili la vânturi puternice, fiind dezrădăcinați și doborâți, iar la vânturi foarte puternice nu rezistă nici celelalte categorii de arbori.

Până în prezent, în analizele privind stabilitatea arborilor nu s-au evidențiat în mod detaliat sistemele radiculare ca fundații armate și ancorate, cu solicitările exterioare și interioare aferente. În prezenta modelare matematică, aceste solicitări sunt bine definite, prin relații care permit cuantificarea lor, în scopul determinării stabilității arborilor și implicit a arboretelor. Este evident că numai greutatea volumului fundației arborilor, fără un sistem de armare și ancorare, nu ar putea asigura stabilitatea arborilor, așa cum este asigurată stabilitatea în natură prin sistemele de înrădăcinare.

Bibliografie

- Denischi, A., Marin, I.G., Antonescu, D. (ed.), 1989. Biomecanica, Editura Academiei R.S.R., București.
- Grudnicki F., 1994. Contribuții la biomecanica formei arborilor, Analele Universității „Ștefan cel Mare” Suceava, Secțiunea Silvicultură, Vol. I.
- Giurgiu, V., Decei, I., 1997. Biometria arborilor din România. Editura Științifică, București, 307 p.
- Parascan D., Danciu M., 1991, Botanica și fiziologia plantelor, Universitatea Brașov.

- Redlov T., 1969. Curs general de rezistența materialelor, vol. I-II, Institutul Politehnic Brașov.
- Redlov T., 1977. Mecanica teoretică. Universitatea Brașov.

Autorul: Ing. Francisc Grudnicki activează în calitate de cadru didactic asociat la Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava, Facultatea de Silvicultură. Poate fi contactat prin intermediul redacției.