A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",
SEBEȘ, 2011

STUDIUL FORȚELOR CARE ACȚIONEAZĂ ASUPRA OSULUI FEMURAL

Ioana Alexandra TAKACS, Adrian Ioan BOTEAN, Mihail HĂRDĂU

STUDY OF FORCES THAT ARE APPLIED ON THE FEMORAL BONE

The paper presents a general view over the biomechanics of the femoral bone. The theme is treated both from the static (simple unipodal stand) and dynamic (walking) perspective. The direction of the force that is applied on the femoral bone as well as it's value represent one of the main infect in the forthcoming of the fracture. Their studies have a true importance in the field of researching the appearance of fractures and the causes that precede them.

Keywords: bone, human leg, hip bone, human walking
Cuvinte cheie: țesut osos, membru inferior uman, os femural, mersul uman

1. Introducere

Țesutul osos este considerat un complex morfofuncțional care pe lângă rolul mecanic (determină forma, serveşte ca sprijin pentru întregul corp şi pentru părțile moi, protejează organe) are şi un rol metabolic deosebit de important (constituie rezerva pentru ionii de calciu şi fosfor ai organismului) [7].

Din punct de vedere histologic țesutul osos este alcătuit din celule, fibre de colagen şi substanță fundamentală.

Fibrele de colagen constituie împreună cu substanța fundamentală matricea proteică a osului. Structura minerală a osului

îi conferă rezistență şi soliditate fiind asemănat cu un “beton armat viu” [7].

Osul trebuie privit ca un țesut în continuă reînnoire datorită solicitărilor fiziologice (creşterea) şi patologice (traumatisme, infecții, tumori) la care este supus, fiind într-o permanentă transformare interioară ca urmare a continuei sale adaptări la condițiile diferite în care se găseşte.

Elementele de structură osoasă suferă transformări în direcția forțelor de compresiune sau tracțiune, orientarea lamelor osoase realizându-se în mod corespunzător, ceea ce conferă osului o structură morfofuncțională complexă [7].

Întreaga structură a *sistemul osos* este supusă unor modificări atât ale reliefului exterior cât şi arhitecturii interne, în concordanță cu condițiile generale de activitate.

Aspectul radiologic al oaselor se modifică în funcție de solicitările funcționale care produc o densificare osoasă (osificare[1]) sau în lipsa mobilizării, o rarefiere osoasă (resorbție osoasă[2]) cu ştergere treptată a arhitecturii [7].

Secțiunea longitudinală a unui os prezintă două aspecte: *osul compact* (cortical) aflat la periferie, având grosimi variabile şi *osul spongios* dispus central, având aspect de burete (figura 1).

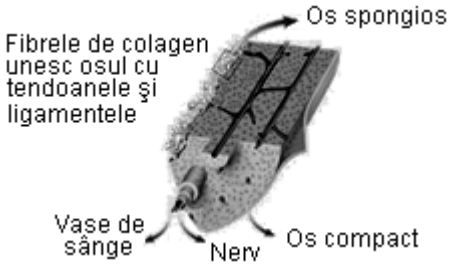

Fig. 1 Structura internă a unui os lung. Osul compact [9]

Ambele substanțe osoase sunt formate din lamele osoase,alăturate sau alipite în cazul osului compact, fără a delimita cavități intermediare şi orientate în sensuri diferite, delimitând o serie de cavități unde se află măduva osoasă în cazul osului spongios. Mărimea cavităților variază de la un bob de fasole la o gămălie de ac (figura 2).

[1] Osificarea - proces complex de formare, dezvoltare şi reparare a țesutului osos [8].
[2] Resorbția osoasă - procedeu care se caracterizează prin scăderea concetrației osoase până la dispariția completă a osului [8].

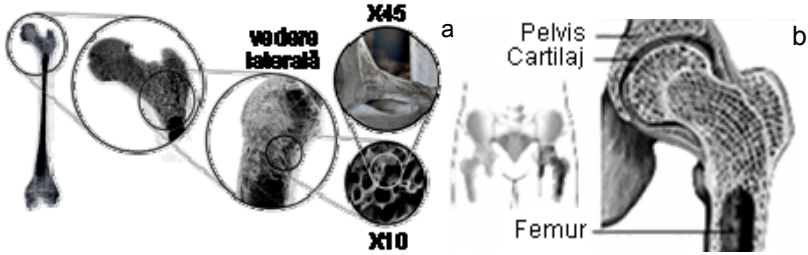

Fig. 2 Variația densității osului spongios pentru femurul uman
într-o secțiune longitudinală; detaliu: a) rezoluții diferite ale osului spongios;
b) articulația coxo-femurală [10]

Dintre cele 208 oase ale s*cheletului uman* 34 alcătuiesc coloana vertebrală iar restul de 174 se grupează în jurul acesteia. Oasele *membrului inferior uman* se divid în două grupe: centura membrului formată din oasele coxale şi membrul liber.

Oasele membrului liber sunt situate la nivelul celor trei segmente ale membrului inferior: la coapsă se găsesc femurul şi patela (articulația coxo-femurală), la gambă tibia şi fibula (articulația genunchiului), iar la picior distingem tarsul, metatarsul şi oasele degetelor (articulația gleznei) (figura 3) [4].

Cele două funcții majore are MIU[3] *sunt:* locomoția şi susținerea greutății corpului cu un consum minim de energie. Cea din urmă presupune două etape: însumarea tuturor mişcărilor din articulațiile MIU pentru a putea poziționa talpa piciorului pe sol şi mutarea corpului peste talpă [5].

La majoritatea oamenilor lungimea membrelor pelvine[4] este inegală, membrul drept fiind mai scurt decât cel stâng. Diferențe în lungimea membrelor pelvine de până la 1 cm sunt clinic irelevante. Articulațiile mari ale membrului inferior: articulția şoldului, articulația genunchiului şi articulația gleznei, se află în mod normal pe o linie, *linia lui Mikulicz*[5] (figura 4) [6].

Axa de solicitare mecanică a membrului pelvin este reprezentată de linia ce uneşte centrul capului femural cu mijlocul cleştelui bimaleolar (articulația gleznei).

Doar la nivelul tibiei axa anatomică se suprapune cu axa mecanică de solicitare. *Axa biomecanică* uneşte centrul capului femural cu centrul articulației genunchiului şi formează cu axa

[3] MIU - membrul inferior unam.
[4] Membrul pelvin - membrul inferior uman (MIU) [6].
[5] Jan Mikulicz-Radecki (1850 - 1905) = chirurg ucrainian .

diafizei femurale un unghi deschis în sus, a cărui valoare variază de la 6 – 9º, în raport cu lungimea colului femoral şi lungimea diafizei femurale [2].

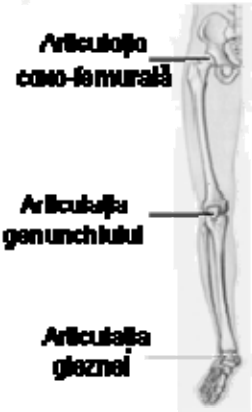

Fig. 3 Articulațiile MIU

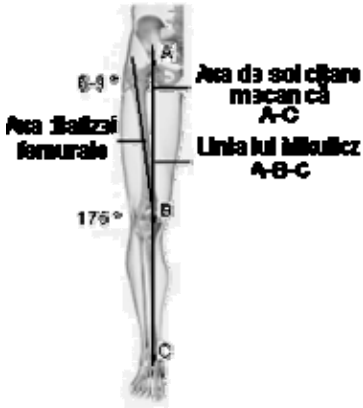

Fig. 4 Axele membrului pelvin

Axa diafizei formează cu axa diafizei tibiale un unghi de 175º, în plan frontal, cu deschidere laterală, unghiul femurotibial. Lungimea aparentă a membrului pelvin este dependentă de solicitările greutății corporale în timp ce lungimea absolută, definită de lungimea elementelor scheletice, rămâne constantă [6].

2. Osul femural

Femurul este cel mai lung os al corpului omenesc; este un os pereche. Când călcâiele sunt alipite, cele două femure se ating prin epifizele lor inferioare (articulația genunchiului), oblicitate mai accentuată la femei [4].

Femurul poate fi prezentat ca fiind alcătuit dintr-un corp şi două epifize (figura 5). Diafiza este alcătuită dintr-un cilindru gol la interior (cavitate medulară), al cărui pereți sunt constituiți din țesut compact de o mare rezistență, cu o grosime de 4 -5 mm sau chiar 9 - 10 mm la nivelul linie aspre [1]. Cavitatea medulară pătrunde în epifize, unde se îngustă, datorită unor sisteme lamelare ogivale[6] ale

[6] Ogival - în formă de ogivă; *ogiva* - element arhitectural (întâlnit mai ales la construcțiile în stil gotic) format din intersecția a două arcuri de cerc care se întâlnesc în vârful unei verticale ridicate la o distanță egală de centrele lor [8].

substanței spongioase. În cavitatea medulară se află măduva osoasă [4].

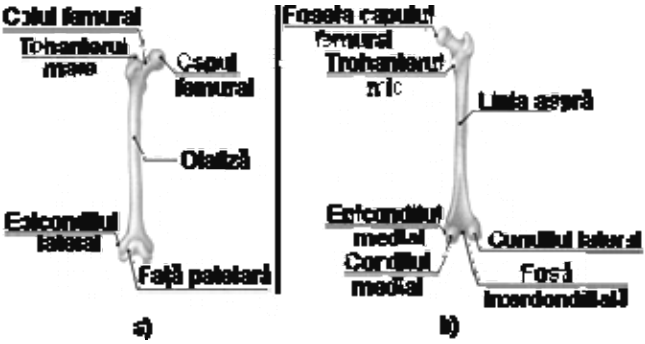

Fig. 5 Osul femural a) vedere anterioară b) vedere posterioară [11]

Epifiza superioară prezintă capul, colul şi două tuberozități[7] numite marele şi micul trohanter. Epifiza superioară este legată de corp prin articulația şoldului.

Epifiza inferioară este un masiv voluminos, mai întins în sens transversal decât în sens anteroposterior. Este formată din două proeminențe articulare puternice, numite condili. Anterior, cei doi condili converg spre o suprafață articulară numită patelară, în timp ce posterior condilii sunt separați de o fosă numită fosa intercondiliară [3].

Pentru femur, extremitățile sunt formate dintr-un înveliş subțire de substanță compactă la periferie, care îmbracă o masă de substanță spongioasă[4]. Prin extremitatea sa superioară se articulează cu cavitatea cotiloidă a coxalului, luând parte la alcătuirea articulației coxofemurale. Prin extremitatea inferioară intră în componența articulației genunchiului [3].

3. Biomecanica osului femural

Femurul este cel mai voluminos os al corpului uman, fapt care indică de la bun început valorile mari ale forțelor care acționează asupra lui. Apariția curburilor femurului a fost explicată de Steindler[8] prin aplicarea calculului de stabilitate (flambaj) (figura 6).

---

[7] Tuberozitate - proeminență osoasă pe care sunt fixați muşchii şi ligamentele [8].

[8] Steindler A. (1878 - 1959) - chirurg ortoped ceh, a avut o influență deosebită în dezvoltarea ortopediei în timpul secolului 20.

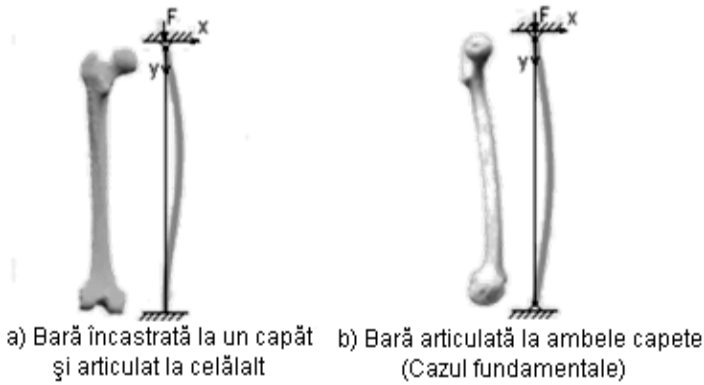

Fig. 6 Reprezentare schematic a apariției curburilor femurului prin calculul de stabilitate la flambaj; a – în plan frontal; b – în plan sagital

Curba concavă situată în plan frontal, a apărut datorită faptului că femurul se comportă ca o coloană încărcată excentric mobilă în partea superioară şi fixată în partea inferioară (figura 6, a).

Se identifică cazul de *compresiune excentrică* în care forța care acționează asupra diafizei are aceeaşi direcție cu axa ei, dar punctul de aplicație nu este în centrul de greutate al secțiunii transversale.

Curbura cu concavitatea posterioară din planul sagital cuprinde întreaga lungime a osului şi a apărut datorită faptului că femurul se comport ca o coloană încărcată central şi mobilă atât în partea superioară cât şi în partea inferioară (figura 6, b) [2].

Studiind structura interioară a diafizei femurale se observă corelația care există între variațiile ei morfologice şi solicitările funcționale la care este supusă.

Se ştie astfel ca tronsonul superior este supus în special forțelor de încovoiere, torsiune şi forfecare, tronsonul median forțelor de răsucire, iar tronsonul inferior în special forțelor de compresiune [2].

Pentru că osul femural face parte din articulația şoldului, biomecanica şoldului poate să ofere informații de o reală importanță.

Cele două tuberozități, trohanterul mare şi trohanterul mic, sunt voluminoase, deoarece pe ele se inseră muşchi puternici.

Dimensiunile acestor tuberozități indică de la început mărimea forțelor care acționează asupra şoldului.

Extremitate superioară a femurului prezintă o arhitectură interioară a sistemelor trabeculare[9], întărind relația dintre formă şi funcție.

În secțiune longitudinală fasciculele trabeculare pornesc din cele două puncte extreme, capul şi marele trohanter şi se îndreaptă spre cele două lame corticale ale corpului femural.

Datorită compresiunii şi a tracțiunii deosebit de puternice, fasciculele trabeculare sunt bine individualizate,în număr de trei dintre care, unul corespunde forțelor de compresiune, iar celelalte două corespund forțelor de întindere (figura 7) [2].

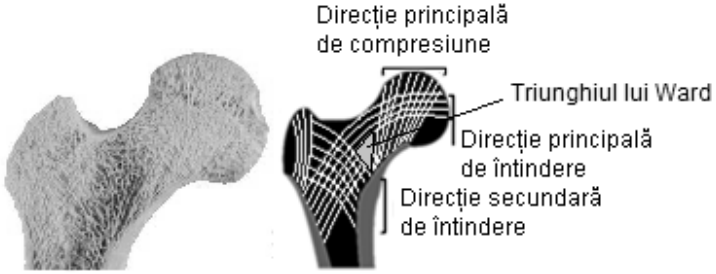

Fig. 7 Arhitectura funcțională a trabeculelor osoase ale extremității superioare a femurului [12], [13]

Între toate cele trei fascicule, la baza colului femural apare o zonă triunghiulară, fără travee[10], triunghiul lui Ward şi reprezintă o zonă de minimă rezistență a extremității superioare a femurului.

La acest nivelul se produc cel mai frecvent fracturi ale colului femural, mai ales la bătrânii sedentari.

În cazul lor resorbția osoasă este mai accentuată, rezistența fasciculelor trabeculare ale extremității superioare a femurului fiind mult mai scăzută [2].

În literatura de specialitate ciclul complet al mersului uman a fost secvenționat în 31 de poziții ale MIU, dintre care 11 (poziția 12 - 22) sunt poziții succesive care constituie sprijinul unipodal.

Dintre acestea, trei poziții reprezentative determină solicitări critice în structura scheletului:

- a 12-a poziție, în care călcâiul piciorului de sprijin atacă solul (figura 9),

[9] Trabecular - formație fibroasă musculară având rol de legătură sau de delimitare [8]
[10] Travee - porțiune de legătură şi susținere între două formațiuni anatomice periferice

- a 16-a poziție, în care întregul picior este în contact cu solul (figura 10) şi

- a 22-a poziție, în care halucele[11] părăseşte solul (figurile 8, 9, 10) [1].

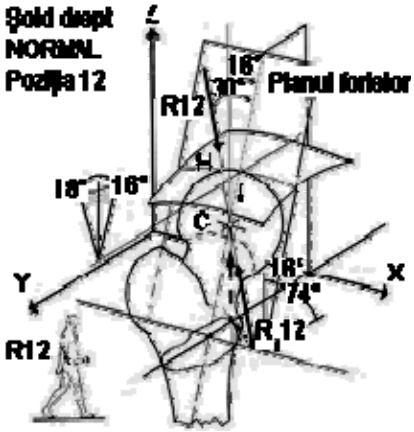

Fig. 8 Poziția 12 [1]

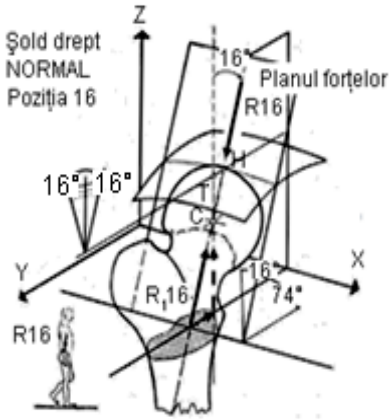

Fig. 9 Poziția 16 [1]

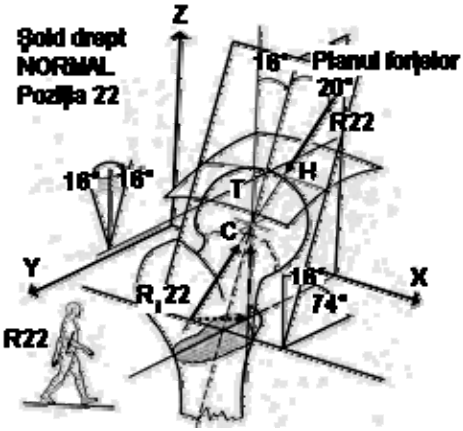

Fig. 10 Poziția 22 [1]

Greutatea corpului este transmisă de la coloană spre sacrum[12] (figura 11). Prin intermediul articulațiilor coxo-femurale

[11] Haluce - degetul mare de la picior [8].

greutatea se transmite mai departe extremității superioare a femurului. Trabeculele osoase atât ale coxalului cât şi ale extremității superioare a femurului sunt dispuse pe traiectoriile tensiunilor principale.

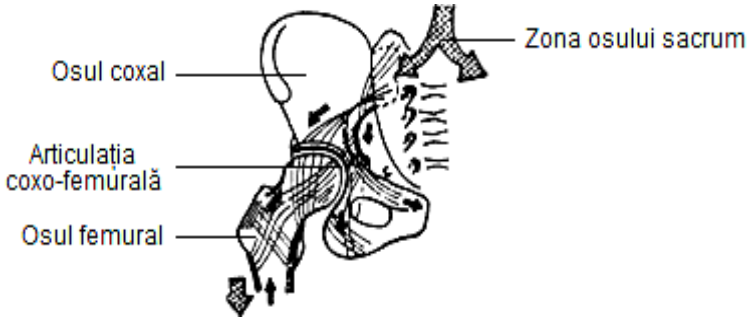

Fig. 11 Direcția de transmitere a greutății corpului G [1]

Articulațiile coxo-femurale constituie zona prin care bazinul transmite greutatea corpului membrelor pelvine dar şi centrul în jurul căruia îşi poate modifica poziția.

Echilibrul articulației coxo-femurale în plan frontal pentru poziția unipodală este asigurat de echilibrul dintre greutatea G a corpului şi forța musculară F_m a abductorilor[13].

Echilibrul se realizează în cadrul unei pârghii de gradul 1.

Forța G reprezintă greutatea corpului din care scădem greutatea membrului pelvin de sprijin.

Linia de acțiune a acestei forțe trece prin centrul de greutatea al corpului şi cade în centrul articulației coxo-femurale, ajungând până la talpa piciorului de sprijin [1].

Forța F_m, reprezentând forța muşchilor abductori echilibrează greutatea corpului care tinde să basculeze bazinul pe partea opusă piciorului de sprijin, acționând extern față de centrul articulației coxo-femurale.

Rezultanta R a celor două forțe G şi F_m acționează pe o direcție care face un unghi de 16^0 față de verticală, ajungând în centrul capului femural (C) (figura12).

---

[12] Sacrum - os triunghiular la partea inferioară a coloanei vertebrale, care împreună cu oasele pelviene formează bazinul [8].

[13] Muşchi abductori - muşchi care îndepărtează un membru de planul de simetrie al corpului sau două organe unul de celălalt [8].

Mărimea rezultantei depinde de mărimea celor două componente, G şi F_m, şi de mărimea braţelor de pârghie a şi b ale forţei musculare F_m şi greutăţii parţiale a corpului G [1].

Condiţiile de echilibru se realizează când $F_m \cdot a = G \cdot b$. Mersul nu este decât o succesiune de momente de sprijin unipodal, alternative, în care modificarea planurilor şi direcţiilor după care acţionează forţele se datorează oscilaţiilor centrului de greutatea al corpului.

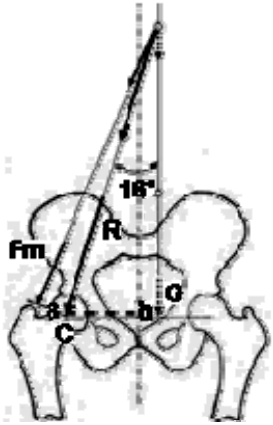

Fig. 12 Punctul de aplicaţie al rezultantei R

Rezultanta R trece prin centrul capului femural şi îşi schimbă direcţia în timpul mersului, datorită deplasării centrului de greutate al corpului.

Dacă în poziţia 16 este îndreptată în jos şi în afară, făcând un unghi de 16° cu verticala, în poziţia 12 are şi o înclinaţie anterioară, iar în poziţia 22 şi o înclinaţie posterioară, pe lângă cea externă (figurile 8, 9, 10).

Prin urmare, în timpul mersului centrul de greutate îşi schimbă poziţia în fiecare moment, prin oscilaţii laterale în planul frontal şi oscilaţii vertical în planul sagital după cum urmează în tabelul 1 (Variaţia direcţiei rezultantei R în timpul mersului).

Tabel 1

Poziţii în timpul mersului	Unghiul de înclinaţie al rezultantei R[°]	
	Plan frontal	Plan sagital
12	16	30
16	16	0
22	16	20

3. Concluzii

■ Analiza poziţiilor aferente sprijinului unipodal din succesiunea ciclului complet al mersului prezintă trei situaţii de interes reprezentate de poziţiile 12, 16 şi 22.

■ În colul femural rezultanta R produce încovoiere şi forfecare, prin componenta T şi compresiune prin componenta R. Solicitarea compusă care se realizează este una din cauzele producerii fracturilor în zona colului femural.

■ Resorbţia osoasă este un alt motiv al apariţiei fracturilor. Pentru oamenii în vârstă, datorită sedentarismului fracturile de col femural se produc mai frecvent, rezistenţa fasciculelor trabeculare ale extremităţii superioare a femurului fiind mult diminuată.

■ Atât mărimea cât şi geometria şi arhitectura internă a osului femural sugerează capacitatea ridicată a acestui segment osos de a prelua solicitări mari.

Totuşi fracturi ale colului femural cât şi cele ale diafizei femurale se produc deopotrivă în cazul oamenilor tineri şi a oamenilor în vârstă.

BIBLIOGRAFIE

[1] Antonescu, D., Buga, M., Constantinescu, I., Iliescu, N., *Metode de calcul şi tehnici experimentale de analiza tensiunilor în biomecanică*, Editura tehnică, Bucureşti, 1986.

[2] Baciu, C., *Aparatul locomotor. Anatomie funcţională, biomecanică, semiologie clinică, diagnostic diferenţial*, Editura Medicală, Bucureşti, 1981.

[3] Papilian, V., *Anatomia omului, Volumul 1 Aparatul Locomotor*, Editura didactică şi pedagogică, Bucureşti, 1982.

[4] Papilian, V., *Anatomia omului. Aparatul Locomotor*, Ediţia 12, Editura Bic All, 2006.

[5] Standring, S., *Gray's Anatomy, Basis of Clinical Practice*, Churchil Lvingstone, Ediţia 40, 2004.

[6] Şora, M.C., Poenaru, D.V., *Mersul uman,* Editura Mirton, Timişoara, 2004.

[7] Tomoia, Gh., *Curs de traumatologie osteoarticulară,* Editura Medicală Universitară "Iuliu Haţieganu", Cluj Napoca, 2004.

[8] http://www.dexonline.ro

[9] http://www.unm.edu

[10] http://www.catalog.nucleusinc.com

[11] http://www.edoctoronline.com
[12] http://www.bill.srnr.arizona.edu
[13] http://www.gla.ac.uk

Notă: Această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul "Studii doctorale în ştiinţe inginereşti în scopul dezvoltării societăţii bazate pe cunoaştere - SIDOC ", contract: POSDRU/88/1.5/S/60078, proiect cofinanţat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013."

Drd.Ing. Ioana Alexandra TAKACS
Facultatea de Mecanică, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
e-mail: ioana974@yahoo.com

Asist.Dr.Ing. Adrian-Ioan BOTEAN
Facultatea de Mecanică, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
membru AGIR
e-mail: Adrian.Ioan.Botean@rezi.utcluj.ro

Prof.Dr.Ing. Mihail HĂRDĂU
Facultatea de Mecanică, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Senator, Parlamentul României
e-mail: mihailhardau@yahoo.com