

Varianta constructivă CAD optimizată a structurii mecanice

1. Optimizarea structurală a instrumentului de inserție a acelor de brahiterapie

Pentru a studia comportamentul instrumentului în mediu real, s-au efectuat teste de laborator folosind standul experimental prezentat în Figura 1, pentru a măsura rigiditatea în ceea ce privește deplasările la nivelul efectorului final (gripper-ul cu ac) folosind un ceas comparator. Rezultatele obținute sunt prezentate în Figura 9. Deplasarea elementului de acționare a fost măsurată pe două axe, corespunzătoare axei OX și OY la diferite viteze de inserare, respectiv 10 mm/s (care este viteza maximă de inserare a instrumentului), 5 mm/s și 0,5 mm/s. Au fost efectuate cinci măsurători diferite pentru fiecare axă și fiecare viteză de inserție, folosind diferite zone ale ficatului. În medie, cu cât viteza de inserare este mai mare, cu atât deplasarea măsurată este mai mare la nivelul efectorului final al NID, vârfurile variind între 0,5 și 0,72 mm pe ambele axe (valorile de vârf sunt prezentate în Figura 2 a-f).

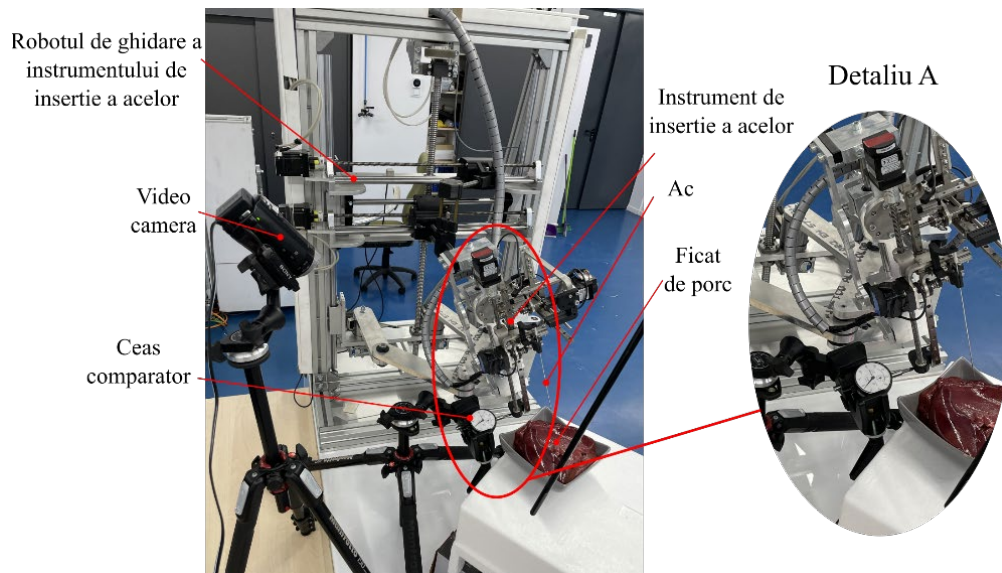


Figura 1. Standul experimental de măsurare a rigidității.

La viteze de inserare mai mici (0,5 mm/s), deplasările măsurate sunt destul de mici, dar, după cum s-a demonstrat, cu cât viteza de inserare este mai mică, cu atât deviația acului este mai mare și astfel, în cele din urmă, precizia de inserție este redusă. Acest lucru este valabil mai ales în perforarea pielii, despre care se știe că este mai dură decât parenchimul. Forța de inserție măsurată în parenchim este de maxim 2 N, ceea ce duce la o rigiditate generală de aproximativ $2,85 \times 10^3$ N/m, care este mai mică decât media unui robot serial. Desigur, deviația acului este problema majoră în timpul inserării acului, cauzând o precizie slabă a instrumentului, dar o mică îmbunătățire a rigidității ar putea duce la o precizie îmbunătățită de inserție.

De asemenea, s-au efectuat o serie de teste și analize utilizând metoda Elementului Finit (FEM). Astfel, s-au efectuat încărcări de 30N pe axa OZ, apoi câte 10N pe axele OX și OY ale instrumentului, evidențiindu-se deformările instrumentului și tensiunile Von Mises pentru fiecare caz în parte. Figura 3 prezintă rezultatele simulărilor statice efectuate pentru poziția cea mai puțin favorabilă în utilizarea instrumentului, indicând deformarea maximă a elementelor componente de 0.3 mm.

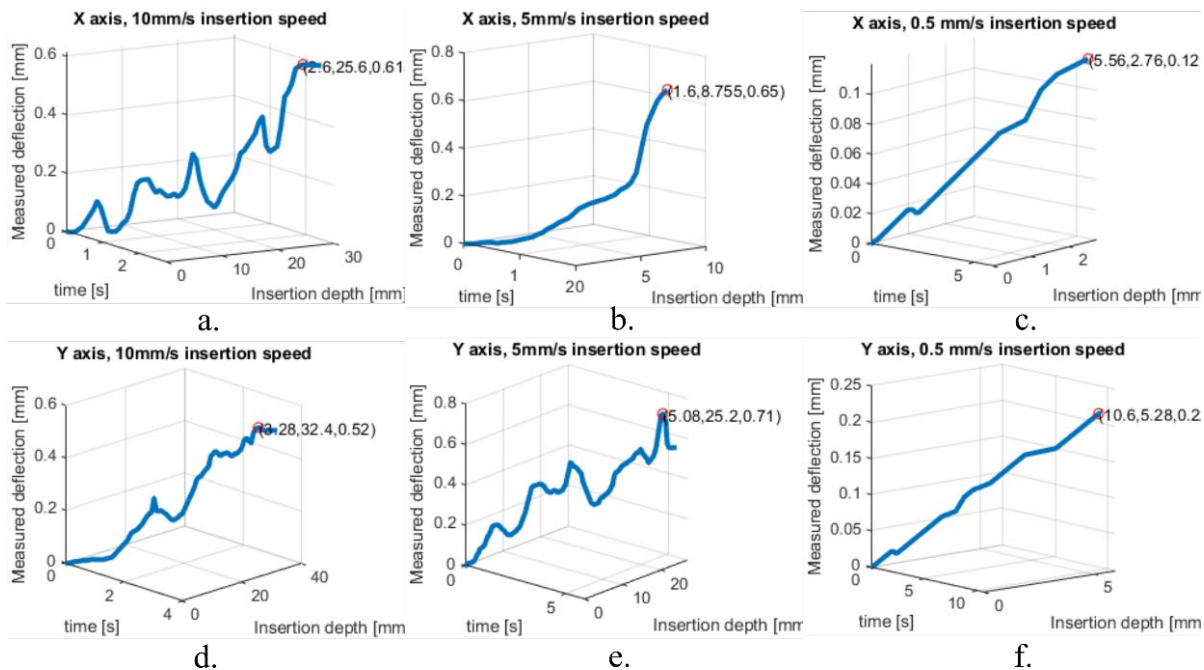


Figura 2. Rezultatele testelor de măsurare a rigidității

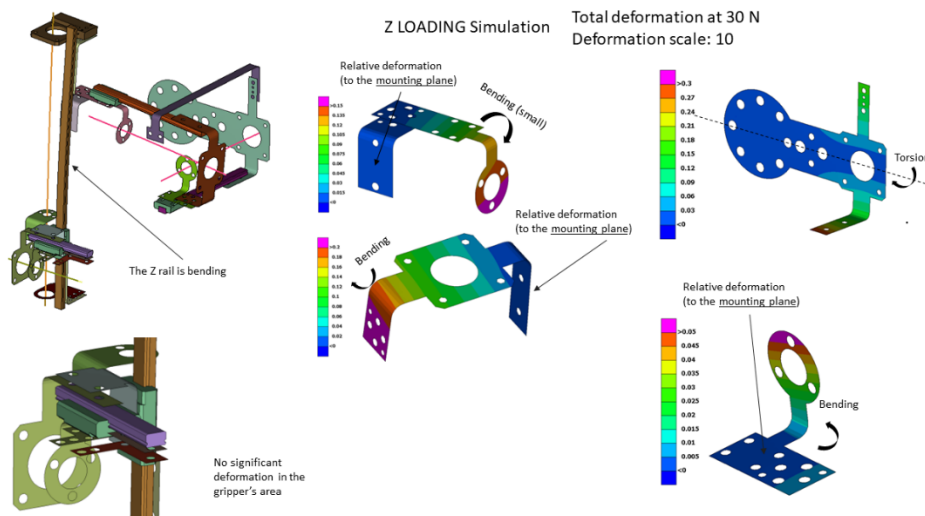


Figura 3. Deformările și tensiunile Von Mises pentru încărcarea pe axa OZ a instrumentului cu 30N

Rezultatele simulărilor pe axa OX sunt prezentate în Figura 4, iar pentru axa OY în Figura 5. Deformarea maximă pentru încărcare pe axa OX este de 0.19 mm, iar pentru încărcare pe axa OY de 0.11, ceea ce conduce la concluzia că este necesară luarea unor măsuri care să reducă această deformare, în speță pe axa OZ.

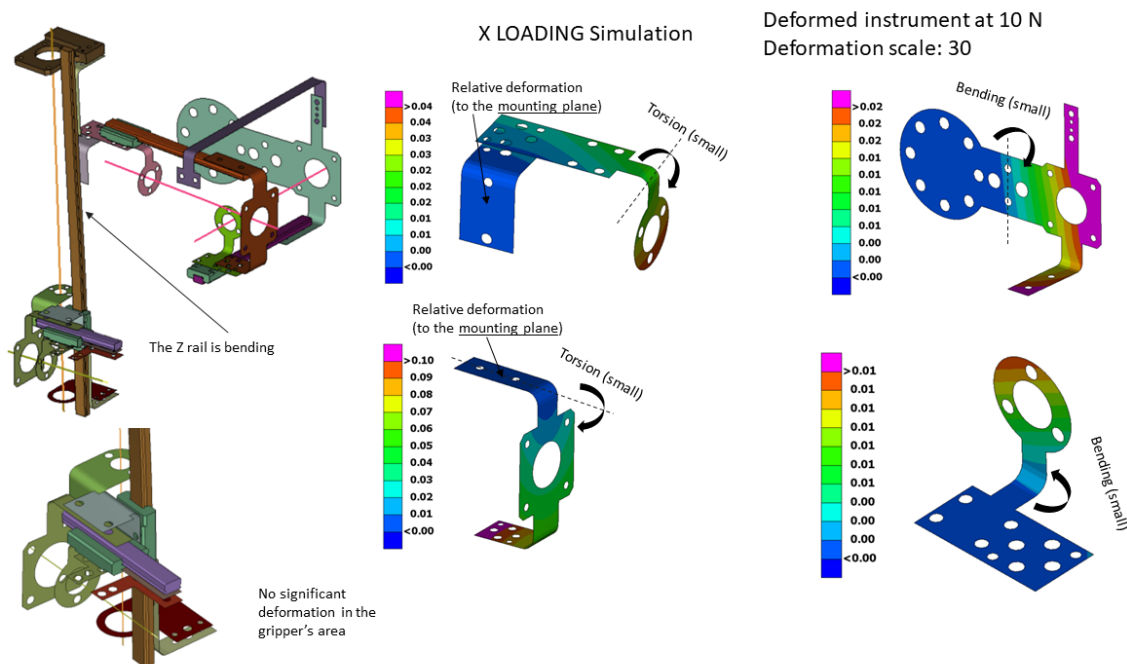


Figura 4. Deformările și tensiunile Von Mises pentru încărcarea pe axa OX a instrumentului cu 10N

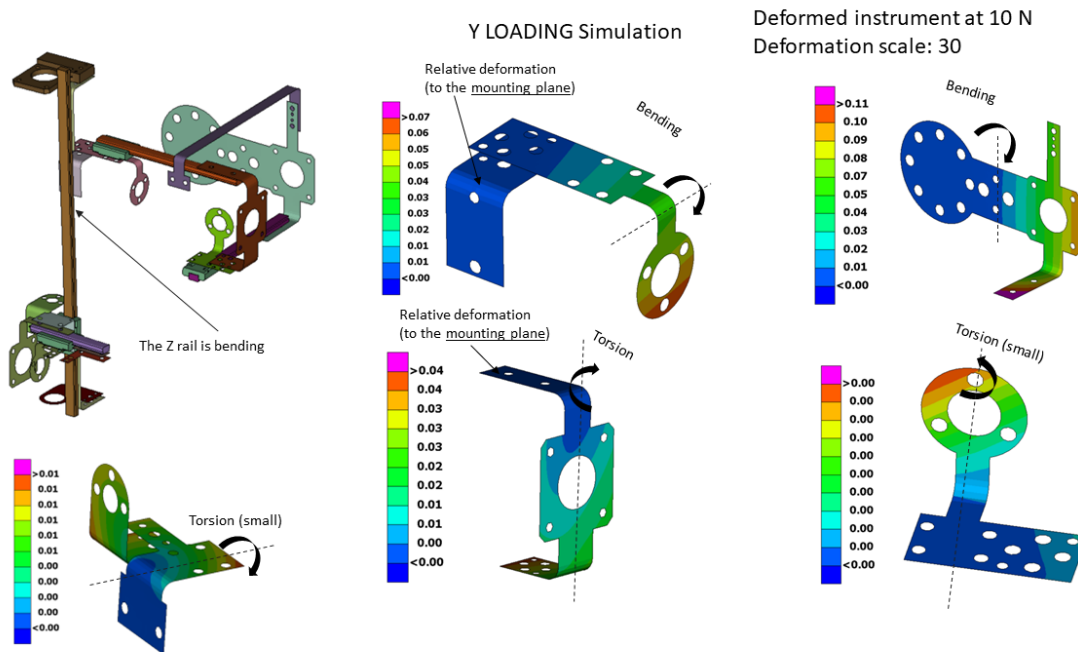


Figura 5. Deformările și tensiunile Von Mises pentru încărcarea pe axa OY a instrumentului cu 10N

Pentru îmbunătățirea rigidității instrumentului pentru inserția acelor s-au propus o serie de soluții, printre acestea fiind: rigidizarea flanșei de prindere a instrumentului prin adăugarea unei plăci cu grosime de 4

mm și a unui colțar din plastic care să rigidizeze șina de prindere a cuplei active q_1 , respectiv a cuplei active q_2 și q_3 (Figura 6)

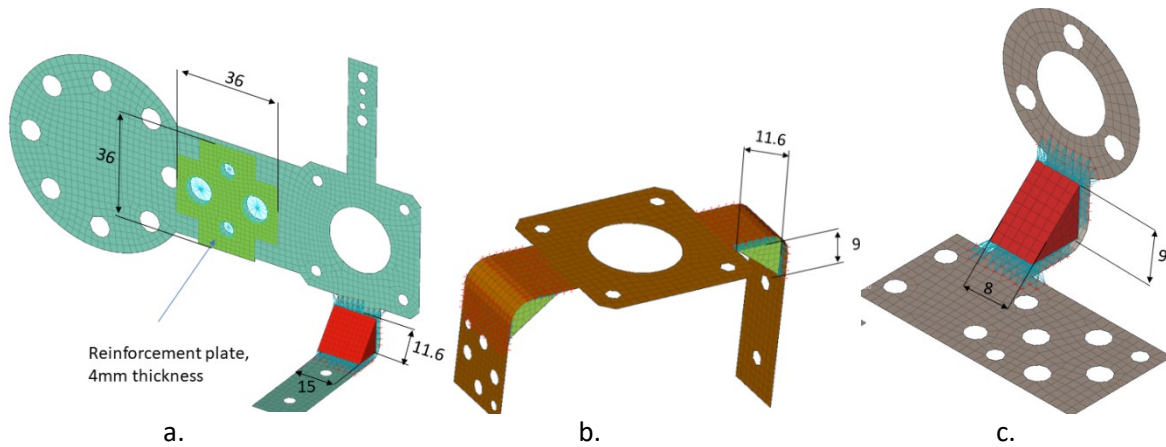


Figura 6. Rigidizarea instrumentului de inserție a acelor: a. a flanșei de prindere a instrumentului de inserție; b. a elementelor de prindere a șinelor corespunzătoare cuplei active q_2 ; c. elementelor de prindere a șinelor corespunzătoare cuplei active q_3

Figura 7 prezintă rezultatele comparate între versiunea inițială și cea propusă, optimizată a instrumentului de inserție a acelor, prin prezentarea tensiunilor Von Mises, cu valori mult îmbunătățite.

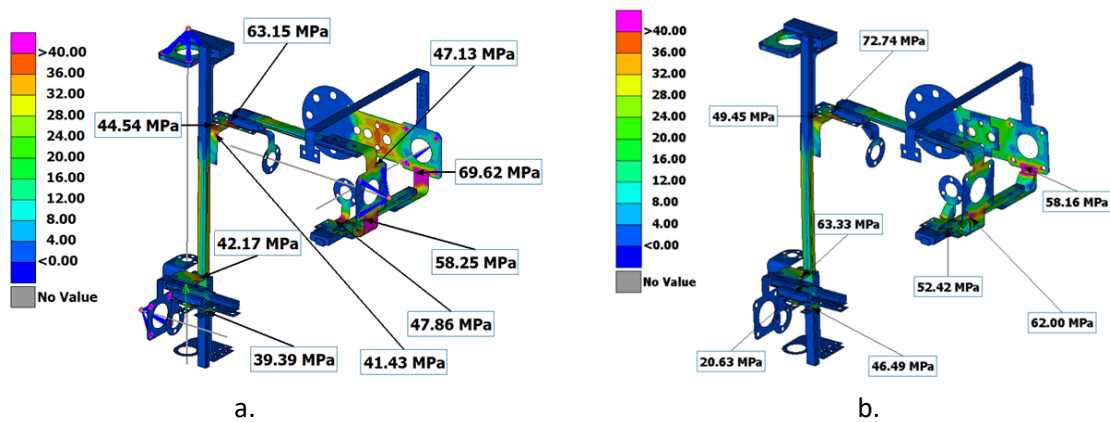


Figura 7. Tensiunile Von Mises pentru instrumentul de inserție a acelor în: a. versiunea inițială; b. versiunea optimizată

2. Optimizarea structurală a instrumentului de ghidare a sondei ecografice intraoperatorii

O simulare utilizând FEM a fost utilizată pentru identificarea elementelor cu rigiditate mai redusă ale instrumentului. Rezultatele simulării FEM confirmă rigiditatea redusă identificată din testele funcționale de laborator. Figura 9a. prezintă încărcarea instrumentului în simulare: instrumentul este fixat pe zona de montare ale flanșei, în timp ce o forță împinge sonda. În timpul simulării, gravitația este de asemenea considerată. Figura 9b. prezintă rezultatele simulării FEM comparând instrumentul nedeformat cu instrumentul deformat sub acțiunea forței considerate, folosind o scară de deformare de 10x. Deformația mare măsurată pe punctul de montare a sondei este cauzată în principal de flanșa instrumentului care se

poate deplasa relativ la flanșa robotului, așa cum este evidențiat în Figura 9b. Mișcarea descrisă anterior este propagată și amplificată în zona de montare al sondei. Mișcarea relativă a componentei C_1 față de șina C_2 este, de asemenea, propagată și amplificată până la punctul de montare al sondei și reprezintă a doua cea mai relevantă zonă cu rigiditate scăzută.

Figura 10a. prezintă soluțiile propuse în vederea optimizării instrumentului de ghidare a sondei. Două distanțiere realizate din material plastic ABS au fost montate între flanșe în pozițiile extreme pentru a evita mișcarea relativă a flanșelor. O sanie glisoare suplimentară a fost montată pe șină pentru a evita mișcarea relativă între componenta C_1 și șina C_2 . Pentru validarea soluțiilor de optimizare, simularea FEM a fost realizată din nou pentru instrumentul optimizat. Figura 10b. prezintă o comparație între instrumentul inițial și cel optimizat. Graficul arată deplasarea totală folosind o scară de 10x. Tabelul 2 prezintă o comparație a rigidității între instrumentul inițial și cel optimizat. Rigiditatea este măsurată în punctul în care se aplică forța. Rezultatele celei de-a doua simulări arată că rigiditatea măsurată la punctul de montare al instrumentului a crescut cu 35%.

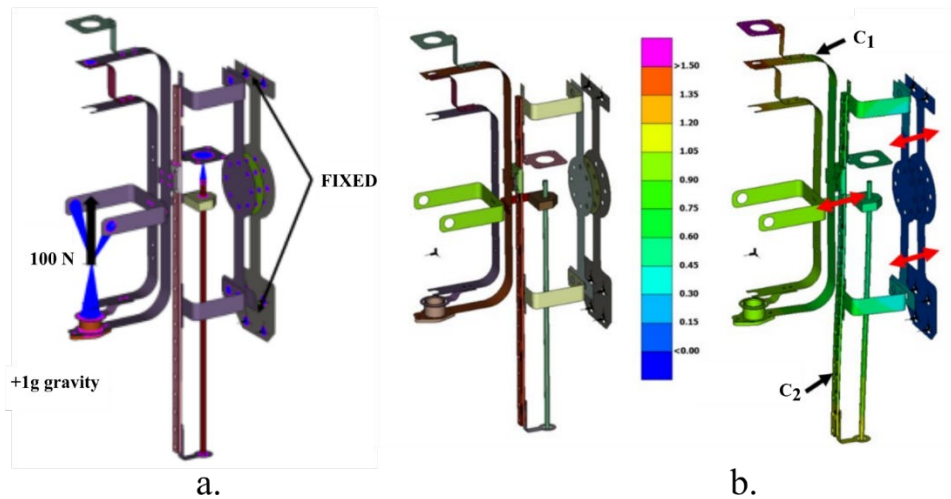


Figura 8. Simularea FEM inițială pentru instrumentul de ghidare a sondei: a. încărcarea statică; b. rezultatele FEM ale simulării inițiale

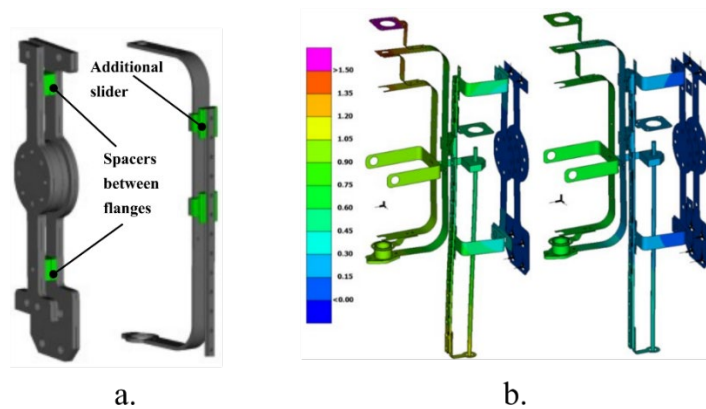


Figura 9. Soluțiile propuse pentru creșterea rigidității instrumentului pentru sondă: a. poziționarea elementelor de rigidizare; b. Simularea FEM în vederea testării rigidității instrumentului optimizat

Tabelul 1. Rezultatele optimizării instrumentului de ghidare a sondei ecografice intraoperatorii

		Soluția inițială	Soluția optimizată	Îmbunătățire [%]
Forța aplicată	[N]	100.00	100.00	
Deformarea totală	[mm]	0.95	0.62	35
Rigiditatea generală	[N/mm]	104.86	160.85	

Pe lângă necesitatea optimizării structurale, instrumentul de ghidare a sondei a fost deficitar și în ceea ce privește soluția de acționare a celor două pârghii care manipulează capul distal al sondei. În ceea ce privește acest aspect ar putea fi adoptate două soluții: soluția 1 – poziționarea motoarelor în apropierea pârghiilor (asigurând acționare directă); soluția 2 - poziționarea motoarelor departe de instrument pe cadrul robotului, utilizând acționarea prin cablu, soluție care a fost adoptată și în modelul actual. Cu toate acestea, în cadrul implementării actuale, au fost observate mai multe probleme: alunecarea cablului (în pozițiile extreme ale pârghiilor) și, în consecință, imposibilitatea de a atinge acele poziții (fie motoare prea slabe, fie eficiență foarte scăzută a sistemului de cabluri).

Pentru a trata în mod corespunzător această problemă, s-a efectuat o măsurare a cuplului necesar pentru a determina experimental cerințele privind acționarea pârghiilor. După cum am menționat anterior, cele două pârghii ocupă poziții discrete (în trei pași pentru fiecare direcție de acționare), acesta fiind unul dintre principalele motive pentru care au fost selectate motoarele pas cu pas, celălalt fiind costul redus. Măsurătorile cuplului au fost efectuate folosind sensorul de forță/cuplu Robotique F/T 300 și o mică configurație pentru a prinde ferm pârghiile, toate fiind acționate manual până în poziția finală a pârghiilor.

Rezultatele experimentului sunt prezentate în Figura 11a., arătând cuplurile măsurate necesare pentru acționarea cuplelor active și luând în considerare o distanță medie de cca. 32 mm, necesarul estimat a fost prezentat în continuare în Figura 11b. Au fost înregistrate valori de vârf de 0,5-0,6 Nm, conducând la o forță de acționare necesară de aprox. 15 N, chiar dacă aceste valori au fost obținute pentru finalul cursei pârghiilor (când pârghiile sunt blocate). Deoarece sistemul actual de acționare prin cablu pentru pârghii (construit în principal din piese de plastic imprimat 3D) nu funcționează corespunzător, a fost luată în considerare și integrată o soluție disponibilă în comerț. Cablurile push-pull sunt o opțiune bună, deoarece designul lor este relativ compact și asigură o forță de acționare mare și pot transfera forța în direcțiile de tragere și împingere, spre deosebire de cablurile Bowden. Din acest motiv, această soluție a fost adoptată.

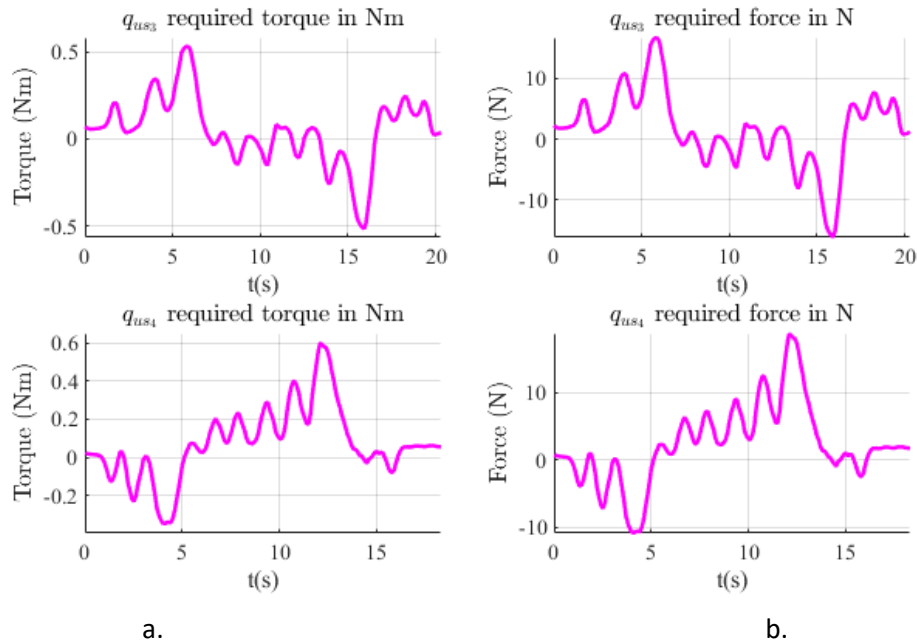


Figura 10. Determinarea experimentală a: a. momentelor de acțiune; b. a forțelor de acțiune asupra pârghiilor sondei ecografice.

Sistemul nou proiectat pentru acțiunea celor două pârghii ale sondei intraoperatorie este compus din două subansamble principale, subansamblul unu (1) și subansamblul doi (2), care se pot observa în cadrul Figurii 11.

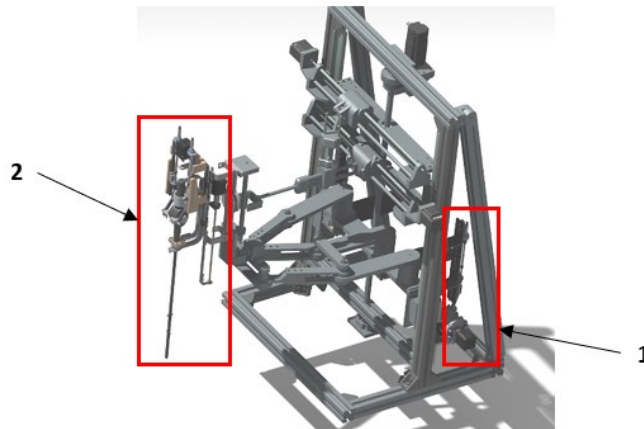


Figura 11. Ansamblu Robot – Modul de ghidare al sondei intraoperatorie

Subansamblul 1 are rol de conversie a mișcării de rotație a motorului în mișcare de translație prin intermediul unui mecanism de tip slider crank (bielă-manivelă). Figura 12 prezintă principalele componente ale acestui sub-ansamblu.

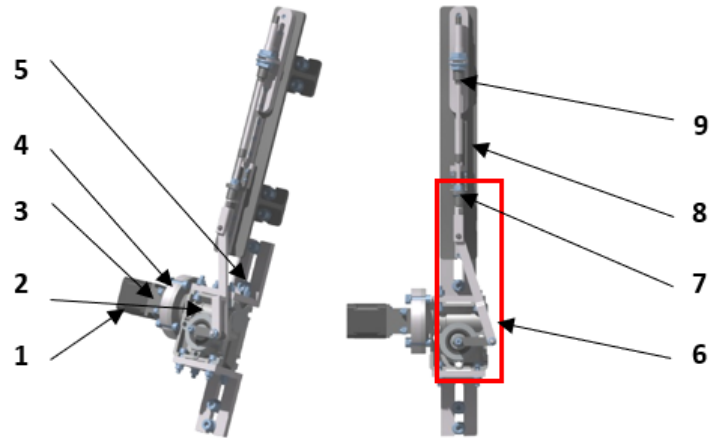


Figura 12. Subansamblul 1

Motorul Nema 17 (1) generează mișcarea de rotație, care este transmisă către reductor prin intermediul arborelui de intrare în reductor. Asamblarea dintre motorul Nema 17 (1) și reductorul melcat (2) se realizează prin intermediul flanșelor (3) și (4). Reductorul melcat este încastrat pe cadrul format din profile de aluminiu al robotului prin intermediul flanșelor de încastrare ale reductorului (5).

Mișcarea de rotație produsă de către reductor (5) este transferată la mecanismul de tip "Slider Crank" (6) prin intermediul arborelui de ieșire din reductor. Pentru a evita crearea unui mecanism de tip "Slider Crank" excentric, atât mecanismul (6) cât și cablul de tip "Push Pull" (7) au fost poziționate pe o flanșă cu rol de distanțare (8). Cablul de tip "Push Pull" este încastrat la un capăt utilizând flanșa de încastrare (9).

În cadrul figurii 13 sunt prezentate principalele elemente componente ale mecanismului de tip "Slider Crank", care realizează transformarea mișcării de rotație în mișcare de translație.

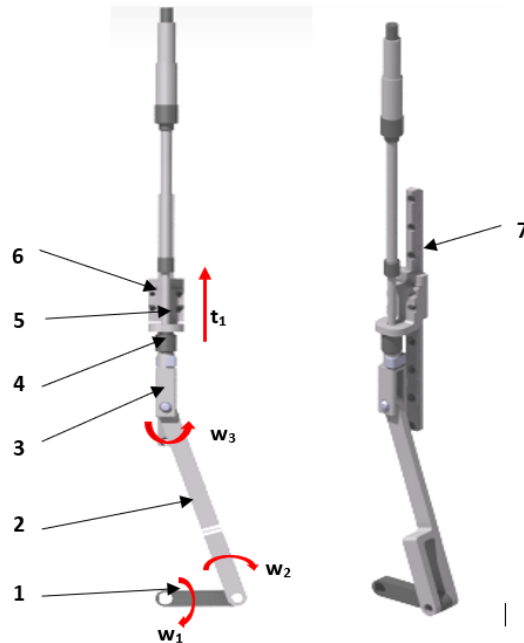


Figura 13. Mecanism de tip "Slider Crank"

“Brat_1” (1) reprezintă primul element component al mecanismului de tip “Slider Crank”, fiind încastrat pe arborele de ieșire din reductor prin intermediul unui decupaj de tip “D”. Elementul (1) realizează mișcarea de rotație w_1 . “Brat_2” reprezintă al doilea element component al mecanismului de tip “Slider Crank”, acesta realizează mișcările de rotație w_2 și w_3 . Mișcarea de rotație w_3 este posibilă datorită cuplei cilindrice de tip “Clevis” (3).

În vederea menținerii unei mișcări de translație uniforme, fără devieri de la traiectorie, s-a decis utilizarea unui ansamblu format din flanșa de încastrare a capătului cablului (5), o sanie (6) și o șina (7). Având în vedere că filetul cuplajului de tip Clevis este M6 iar filetul de la capătul cablului de tip “Push Pull” este M5, s-a utilizat un adaptor (4).

Mișcarea de translație generată de mecanismul de tip “Slider Crank” se transmite de la subsansamblul 1 la subsansamblul 2 prin intermediul cablului de tip Push Pull.

Atât subsansamblul 2 cât și principalele elemente componente ale acestui subsansamblu sunt ilustrate în cadrul Figurii 14.

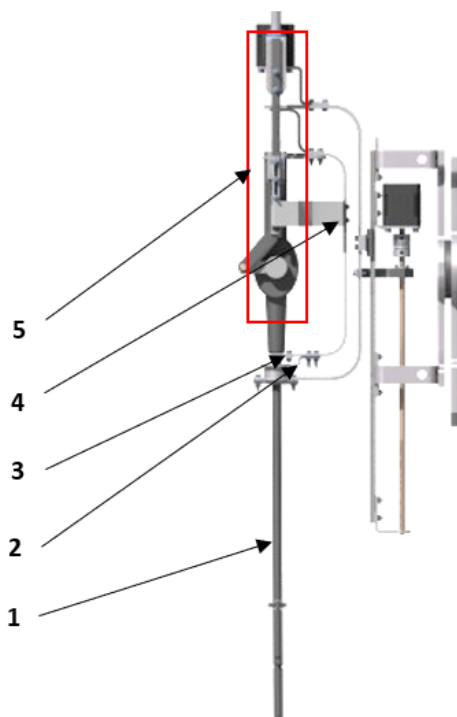


Figura 14. Subsansamblul 2

Mecanismul de tip “Slider Crank” al subsansamblului doi este realizat în mod asemănător cu primul, acest mecanism convertind mișcarea de translație a cablului de tip “Push Pull” în mișcarea de rotație a brațului sondei intra-operatorie.

Principalele componente ale subsansamblului doi sunt reprezentate de către sonda (1), flanșele de încastrare (2,3,4) și mecanismul de tip “Slider Crank” (5).

Prof. univ. dr. ing. Doina PISLĂ

DPisla