

**UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI**  
**FACULTATEA DE INGINERIE MECANICĂ ȘI MECATRONICĂ**  
**ȘCOALA DOCTORALĂ**  
**DEPARTAMENTUL DE ORGANE DE MAȘINI ȘI TRIBOLOGIE**



**TEZĂ DE DOCTORAT**  
**— REZUMAT —**

**CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND TRIBOLOGIA  
PIELII CU APLICAȚII LA PRINDEREA DIRECTĂ ȘI INDIRECTĂ A  
OBIECTELOR**

**DOCTORAND: ANDREI CĂLIN**

**COMISIA DE DOCTORAT**

<b>PREȘEDINTE</b>	<b>PROF. DR. ING. RADU CHIRIAC</b>	<b>UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI</b>
<b>CONDUCĂTOR DE DOCTORAT</b>	<b>PROF. DR. ING. ANDREI TUDOR</b>	<b>UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI</b>
<b>REFERENT</b>	<b>PROF. DR. ING. DUMITRU OLARU</b>	<b>UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN IASI</b>
<b>REFERENT</b>	<b>CONF. DR. ING. FLORIN MUNTEANU</b>	<b>FACULTATEA DE BIOINGINERIE MEDICALĂ DIN UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE „GRIGORE T POPA”DIN IASI</b>
<b>REFERENT</b>	<b>PROF. DR. ING. SORIN CĂNĂNĂU</b>	<b>UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI</b>

<b>1. Capitolul 1. Stadiul actual al cercetării</b>	<b>1</b>
1.1.Introducere	1
1.2.Funcțiile și structura pielii umane	3
1.3.Studiul frecării	7
1.4.Răspunsul mecanic al pielii umane	14
1.5.Characteristicile frecării la nivelul pielii	18
1.6.Obiectivele tezei	25
<b>2. Capitolul 2. Teorii folosite pentru modelarea stării de tensiuni și deformații la contactul degetului uman cu corpuri artificiale</b>	<b>26</b>
2.1.Corpuri elastice	26
2.2.Corpuri vâscoelastice	27
2.3.Modelarea contactului	33
2.4.Anizotropia pielii umane	43
2.5.Comportarea vâscoelastică a pielii umane - Starea de deformații și tensiuni la contactul vâscoelastic dintre degetul uman și un penetrator plan rigid	44
2.6.Concluzii	63
<b>3. Capitolul 3. Evaluarea geometriei degetelor umane</b>	<b>64</b>
3.1.Evaluarea dimensională	64
3.2.Efectul unghiului de contact asupra ariei de contact	65
3.3.Scanarea 3D a unui deget	68
3.4.Funcțiile fiecărui deget	71
3.5.Modelarea cu element finit a degetului	71
3.6.Concluzii	82
<b>4. Capitolul 4. Studiul contactului dintre degetul uman și materiale solide la viteze foarte mici</b>	<b>83</b>
4.1.Mișcarea sacadată de tip „Stick-Slip”	83
4.2.Studiu experimental pe standul „Stick-Slip”	86
4.3.Studiu experimental pentru fenomenul de stick-slip pe standul „CETR-UMT2”	102
4.4.Studiu experimental pentru măsurarea ariei de contact pe standul „CETR-UMT2”	112
4.5.Studiu experimental pentru măsurarea fluajului prin indentare pe standul „CETR-UMT2” și determinarea modulului lui Young pentru pielea degetelor umane	115
4.6.Concluzii	122
<b>5. Capitolul 5. Model teoretic stick-slip cu includerea fluajului și a stabilității de contact</b>	<b>123</b>
5.1.Introducere	123
5.2.Model teoretic	124
5.3.Concluzii	137
<b>6. Capitolul 6. Concluzii generale. Contribuții. Perspective.</b>	<b>138</b>
6.1.Concluzii generale	138





6.2.Contribuțiile prezentei teze	138
<b>7. Bibliografie</b>	<b>141</b>
<b>8. Listă de lucrări</b>	<b>156</b>
<b>9. Anexe</b>	<b>157</b>



## Cuvinte de mulțumire

Am privilegiul de a-l avea drept conducător de doctorat pe domnul Profesor Andrei TUDOR. Sunt profund recunoscător pentru sfaturile, sprijinul, expertiza științifică a dumnealui, și, mai presus de toate, pentru încurajările consecutive pe care mi le-a transmis. Nu există suficiente cuvinte de recunoștință pentru a va exprima toată admirația mea.

Aș dori să transmit mulțumirile mele membrilor comisiei de îndrumare pentru sprijinul, sfaturile și timpul acordate pe perioada studiilor doctorale, domnului Profesor Sorin CĂNĂNĂU, domnului Profesor Petre Lucian SEICIU și doamnei Conferențiar Georgiana CHIȘIU.

Adresez mulțumiri referenților oficiali pentru timpul dedicat analizei tezei, pentru aprecierile și eforturile pe care le-au făcut pentru a asista la susținerea publică.

Îmi exprim recunoștința întregului colectiv al Departamentului de Organe de Mașini și Tribologie. Vă mulțumesc pentru susținerea și încrederea pe care le-am simțit. Datorită sprijinului vostru, am reușit să depășesc toate obstacolele din drumul către obiectivul meu.

Vreau să mulțumesc prietenilor mei pentru că mi-au oferit constant sprijinul lor. Mă îndoiesc sincer că aș fi putut termina fără ei. Sunteți cu toții un cadou minunat pentru mine.

Aș dori să-mi exprim recunoștința familiei mele, în special mamei, tatălui meu, fratelui meu și bunicii mele, pentru tot.



**CUVINTE CHEIE: Frecare la nivelul pielii umane, Modelare deget uman, Biotribologie, Stick-Slip**

## OBIECTIVELE TEZEI

În teza de doctorat sunt prezentate studiile teoretice și cercetările experimentale pentru determinarea comportamentului pielii umane, în speță a regiunii papilare, rezultate care contribuie la înțelegerea fundamentală a interacțiunii dintre om și obiecte. Aceste informații pot fi folosite și integrate direct în faza incipientă de dezvoltare de produs pentru a îmbunătăți condițiile de manipulare a obiectelor.

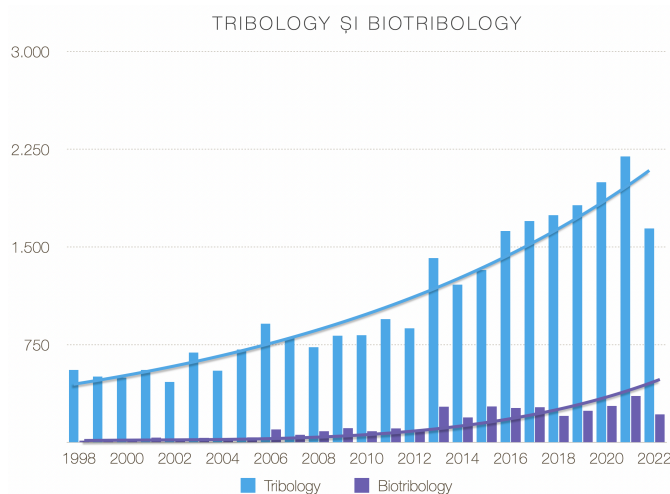
Obiectivele tezei pot fi rezumate astfel:

- Identificarea stadiului actual al cercetării cu privire la studiul din punct de vedere tribologic al pielii umane. (**Capitolul 1**)
- Teorii folosite pentru modelarea stării de tensiuni și deformații la contactul vâscoelastic al degetelor umane cu corpuri de geometrie simplă (plan, cilindru, sferă); Analiza anizotropiei pielii degetelor umane. (**Capitolul 2**)
- Determinarea geometriei degetelor și scanarea 3D a unui deget uman și realizarea unui model FEM pentru modelarea degetului uman. (**Capitolul 3**)
- Studii experimentale pe standul „Stick-Slip” și pe standul experimental CETR UMT-2 din cadrul Departamentului de Organe de Mașini și Tribologie și determinarea caracteristicilor de material pentru pielea umană folosind metoda poansonării utilizând standul experimental CETR UMT-2. (**Capitolul 4**)
- Model teoretic privind fenomenul de stick-slip al contactului degetului uman cu suprafețe rigide artificiale cu luarea în considerație a fluajului. (**Capitolul 5**)

## PREZENTAREA SINTETICĂ A CAPITOLELOR TEZEI DE DOCTORAT

**Capitolul 1** al tezei, prezintă generalități cu privire la studiul frecării la nivelul pielii umane. Cuvântul „biotribologie” a fost folosit pentru prima oară de Dawson și Wright în anul 1973 pentru a descrie aspecte ale tribologiei cu privire la sistemele biologice (Dawson, și alții, 1973).

În acest moment, biotribologia este unul dintre subdomeniile tribologiei cu o rată de creștere a numărului de rapoarte științifice. Graficul de jos reprezintă numărul studiilor științifice având cuvintele cheie „Tribology” și „Biotribology”+ „Bio tribology” prezente pe site-ul ScienceDirect.com în data de 1/06/2022. Datele au fost colectate pentru perioada 1998-2022.



*Figura 1.1 Evoluția numărului de studii științifice din ultimii 22 de ani care au cuvintele cheie „Tribology” și „Biotribology”*



Pielea este un organ multifuncțional complex care acoperă întreaga suprafață a corpului. Pentru a facilita mișcările corpului, pielea trebuie să fie îndeajuns de flexibilă pentru a prelua deformări mari în toate direcțiile și totodată de a reveni la forma inițială. Aceste funcții necesită un spectru larg de proprietăți mecanice. Structura pielii poate fi împărțită în trei straturi. Începând de la exterior, pielea se poate împărți în epiderm, derm și hipoderm. Suprafața totală medie a pielii este de 1.8 m<sup>2</sup>, cu o grosime medie de 1,2 mm și o greutate de 4,2 kg. Raportul dintre suprafață și grosime este de cca. 150.000 (Agache, et al., 2004). Mosteller calculează aria pielii ca fiind aproximativ 2 m<sup>2</sup> (Mosteller, 1987). Richard revizuieste măsurătorile precedente la 25 m<sup>2</sup> motivând calculul său prin faptul ca pielea nu este o suprafață plană ci conține structuri ca foliculii ai firelor de par sau orificii ale glandelor sudoripare care cresc suprafața epitelială considerabil (Richard, 2017).

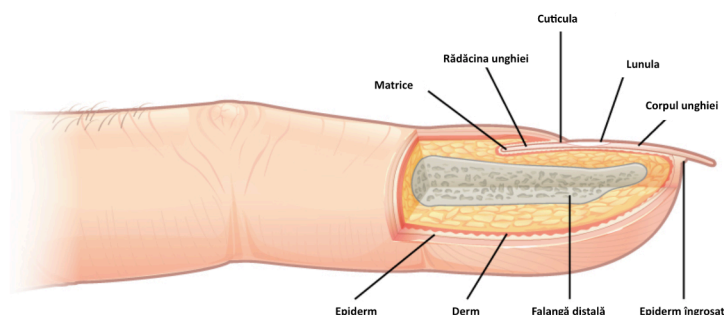


Figura 1.2 Structura anatomică a vârfului degetului uman (University, Rice, 2018)

Când luăm în considerare pielea ca un tot unitar încorporând elementele componente, epidermul, dermul și hipodermul, pielea poate fi clasificată ca fiind:

- anizotropă (Stark, 1977), (Gerhard, și alții, 1981)
- vâscoelastică (Pereira, și alții, 1991)
- neliniară (Brown, 1973)
- neomogenă
- Proprietăți care ajută la preluarea deformărilor mari.

Datorită proprietăților vâscoelastice, pielea trece printr-un fenomen numit precondiționare în care relația dintre efort și deformare în cicluri de încărcare-descărcare variază continuu până când echilibrul este atins (Matsumura, și alții, 2001), (Lui, și alții, 2008). Pielea in-vivo este supusă unui pre-stres (efort unitar) prezent în magnitudini variabile pe toată suprafața corpului în orice moment (Alexander, și alții, 1977), (Jacquet, și alții, 2008).

Răspunsul mecanic al pielii poate fi împărțit în 3 categorii: (Brown, 1973)

Fiecare fază a răspunsului dat are corespondent în comportamentul fibrelor de collagen și elastină din derm:

- Faza I ilustrează deplasarea mare la forțe mici;
- Faza II este legată de fibrele de collagen și elastină care se aliniază pe direcția aplicării forței și cresc modulul de elasticitate;
- Faza III - Fibrele intră sub incidența directă a forței iar răspunsul este aproape liniar. (Brown, 1973)



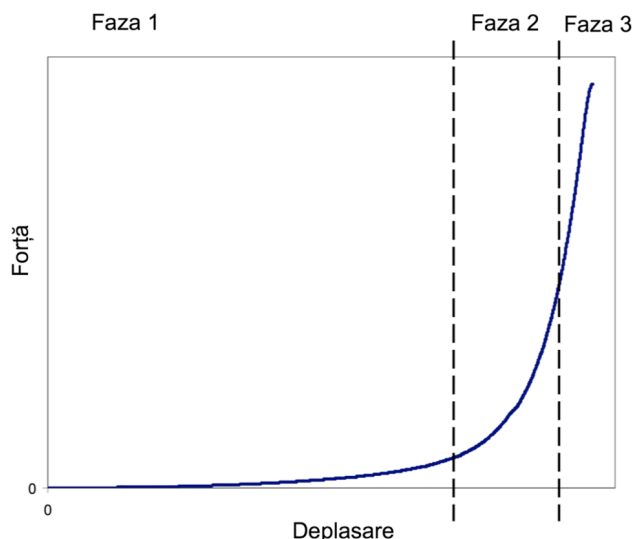


Figura 1.8 Răspunsul mecanic al pielii in vitro (Brown, 1973)

Metoda de examinare in vivo implică evaluarea proprietăților mecanice ale pielii în condițiile cele mai apropiate de starea naturală. Metodele nefiind distructive din motive etice doar 4 au putut fi dezvoltate: torsiunea, tensiunea, sucțiunea și indentarea cu poanson. Valori măsurate ale modulului lui Young sunt prezente în Tabelul 1.2 de mai jos.

Tabelul 1.2 Măsurători in vivo ale Modulului lui Young

Autor	Modulul lui Young	Parte a Corpului	Tehnică de măsurare	Alte date
(Bader, și alții, 1983)	11,1-20 kPa	Antebraț/Picior	Poanson (20 mm)	
(Agache, și alții, 1980)	0,42 MPa	Antebraț	Torsiune (25 mm)	piele tânără
	0,85 MPa			piele în vârstă
	2,1 MPa	Spate		Strat Cornos
(Barel, și alții, 1995)	0,13-0,17 MPa	Antebraț	Sucțiune (2 mm)	
	0,20-0,32 MPa	Frunte		
(Diridollou, și alții, 2020)	0,153 MPa	Antebraț	Sucțiune (6 mm)	
(Sanders, 1973)	0,02-0,1 MPa	Antebraț	Torsiune (8,7 mm)	
(Grahame, 1969)	18-57 MPa	Antebraț	Sucțiune	
(Esoffier, și alții, 1989)	1,1-1,32 MPa	Antebraț	Torsiune	

Frecarea la nivelul pielii umane este un fenomen complex ce nu poate fi descris cu ajutorul teoriei clasice a frecării care poate fi rezumată la proporționalitatea directă a forței de frecare cu forța normală, descrisă de Amontons și derivată experimental (Amontons, 1699).

Factorii care influențează comportamentul frecării sunt multipli. Este în general acceptat faptul că frecarea este influențată de nivelul de hidratare a pielii și materialele cu care pielea este în contact. Consensul în multe lucrări științifice este că o creștere a rugozității suprafeței descrește coeficientul de frecare iar suprafețele higrofile au un coeficient de frecare mai mic decât suprafețele higrofobe (Derler, și alții, 2014); (Cua, și alții, 1990); (Gerhardt, și alții, 2008); (Adams, și alții, 2007).





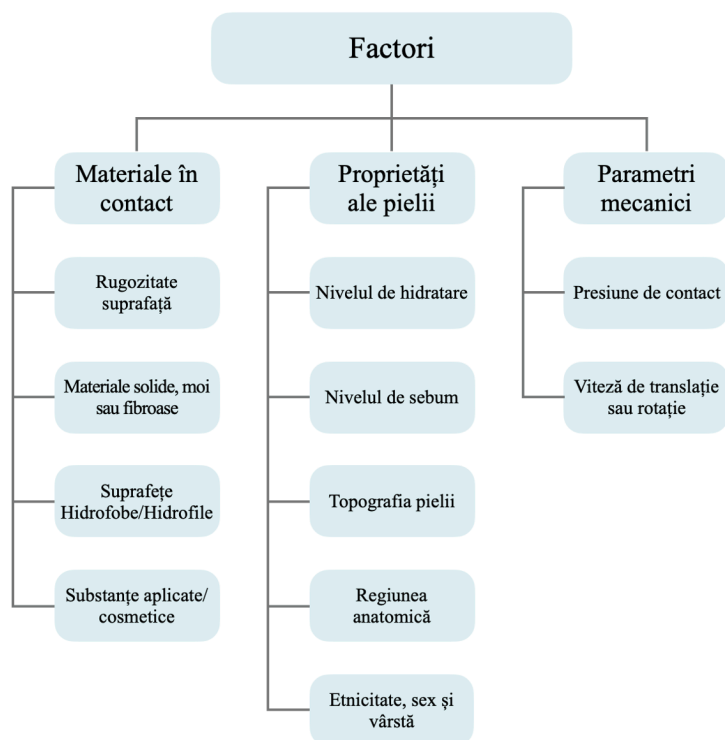


Figura 1.9 Factori care influențează comportamentul frecării la nivelul pielii umane

Particular pielii și frecării pielii, adeziunea este un fenomen foarte complex care este dependent nu doar de nivelul de hidratare, rugozitatea, eventuale tratamente aplicate, prezentei sau lipsei sebumului ci și a altor fenomene ce apar între cele două suprafețe. (Goryacheva, și alții, 2010), au studiat influența microgeometriei și interacțiunilor de adeziune la corpurile vâscoelastice asupra contactului și frecării. Modelul folosit în studiul lor fost Maugis-Dugdale pentru că distribuția tracțiunii la suprafață este compusă din două părți: presiunea la contact Hertz și încărcarea de adeziune Dugdale (Johnson, și alții, 1997).

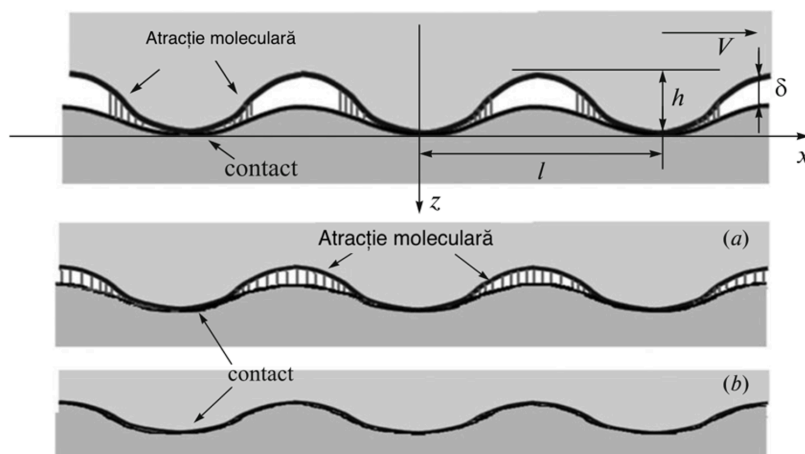


Figura 1.11 Tipurile de contact studiate de (Goryacheva, și alții, 2010)

În Figura 1.11, luăm în considerare trei regimuri diferite: contact discret în regiunile de interacțiune adezive, contact discret în regiunile de interacțiune adezive saturate și contact saturat. În funcție de caracteristicile corpurilor care interacționează și de condițiile de încărcare, se realizează unul dintre aceste regimuri (sarcina și viteza de alunecare).



În **Capitolul 2**, Teorii folosite pentru modelarea stării de tensiuni și deformații la contactul degetului uman cu corpuri artificiale, sunt prezentate diferitele metode de evaluare pentru contactul dintre solide, sunt efectuate simulări pentru evaluarea contactului neconform între solide cu geometrie simplă și sunt prezentate două modele teoretice care descriu starea de deformații și tensiuni la contactul vâscoelastic dintre degetul uman și un penetrator plan rigid și pielea ca material ortotrop.

(Johnson, și alții, 1971) descriu cum două corpuri solide aderă și cum pot fi descrise tensiunile și deformațiile care apar în urma contactului dintre ele. Deformațiile sunt rezultatul a două forțe opuse care apar ca rezultat al tensiunilor de suprafață și a deformațiilor elastice.

Modelul a fost dezvoltat pentru a descrie caracterul microscopic al contactului dintre un solid așa numit moale și un material rigid dar a fost extins și aplicat și pentru alte cuple de material și la o scară mai mică. Modelul JKR ia în considerare doar forțele de adeziune prezente pe aria de contact. Modelul este bazat pe minimizarea energiei prezente în zona de deformații echilibrând energia de adeziune favorizantă pentru contact împotriva energiei elastice care se opune deformațiilor. Mai jos, în Figura 2.14 se poate observa diferența între aria de contact Hertz și aria de contact JKR.

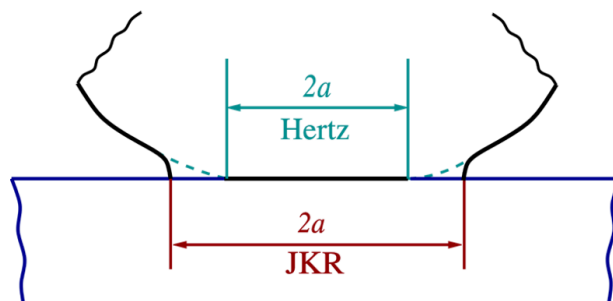


Figura 2.14 Aria de contact în cazul modelului JKR raportat la modelul Hertz.

Pentru corpurile mici în care raportul suprafață-volum devine semnificativ sau pentru materiile moi, forțe de interacțiune de tip adeziv trebuie incluse în modelul teoretic. Modelul DMT dezvoltat de (Derjaguin, și alții, 1975) se pliază pe acest tip de contact și reușește să descrie fidel interacțiunea dintre corpurile aflate în contact. Acest model include și interacțiunile care apar în afara zonei de contact.

(Tabor, 1977) a propus o rezolvare a contradicției dintre teoriile JKR și DMT. A prezentat un parametru numit Parametrul Tabor, și a arătat ca cele două modele sunt limitele extreme ale unui singur model teoretic parametrizat.

Modelele pentru studiul pielii umane pot fi compuse dintr-o structură asemănătoare materialelor compozite. O matrice izotropă care încorporează una sau mai multe tipuri de fibre cu proprietăți mecanice diferite poate fi folosită pentru a genera proprietățile mecanice anizotrope ale pielii. Utilizarea unui astfel de model poate fi un punct de plecare foarte bun atunci când se încearcă simularea caracterului mecanic al unor țesuturi moi, cum ar fi pielea, deoarece pot imita componentele naturale ale țesutului. Țesuturile, cum ar fi mușchii, ligamentele, tendoanele, arterele și pielea sunt toate formate dintr-un material care conține o matrice de fibre, permițând astfel deformări mari și proprietăți anizotrope care diferă în funcție de orientarea matricei și de rețeaua de fibre

Pentru modelarea comportării vâscoelastice a pielii umane, se consideră cazul unui penetrator rectangular rigid în contact cu pielea umană din zona degetelor, Figura 2.16. Geometria poansonului se caracterizează prin lungimea  $L$  și lățimea  $B$  care este mult mai mare decât lățimea  $b$  a degetului ( $B \gg b$ ). Pielea și țesutul respectiv sunt fixate de os considerat rigid (Soldatenkov, 2008). Comportamentul reologic al pielii poate fi aproximat cu comportamentul unui material



Cercetări teoretice și experimentale privind tribologia pielii cu aplicații la prinderea directă și indirectă a obiectelor

Voight-Kelvin. Acest material este caracterizat prin rigiditățile  $k_1$  și  $k_2$   $\left(\frac{Pa}{m}\right)$  și parametrul local de vâscozitate  $\eta$   $\left(\frac{Pa \times s}{m}\right)$ .

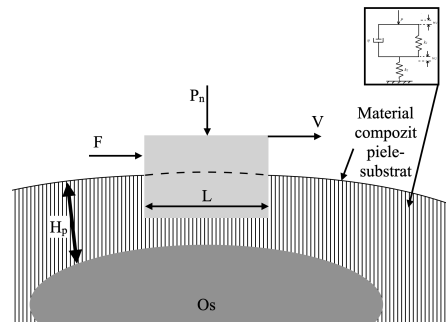


Figura 2.16 Schema contactului deget-plan rectangular

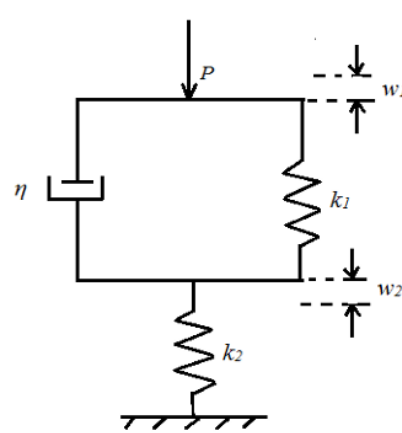


Figura 2.17 Model reologic al pielii umane (material de tip Voigt - Kelvin)

Ecuția constitutivă a materialului Voigt-Kelvin într-un punct oarecare  $\xi$  de pe suprafața de contact, caracterizat prin presiunea  $p_\xi$ , are forma: (Cheng et al., 1999, Soldatenkov 2008)

$$\eta \frac{d}{dt} u_{1\xi} = k_1 u_{1\xi}(t) = p_\xi(t); \quad k_2 u_{2\xi}(t) = p_\xi(t) \quad \text{Ecuția 2.57}$$

unde  $u_{1\xi}$  și  $u_{2\xi}$  sunt deplasările într-un punct  $\xi$  din zona vâscoelastică de vâscozitate  $\eta$  și rigiditate  $k_1$  și din zona de rigiditate  $k_2$ ,  $t$  este timpul,  $p_\xi$  presiunea de contact în punctul  $\xi$ .

Pentru penetratorul plan:

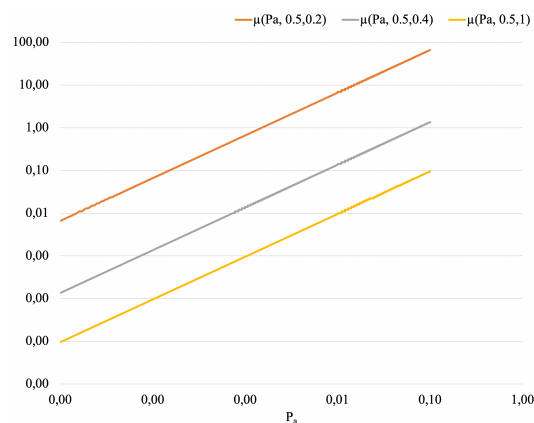


Figura 2.18 Variația componentei de deformare a coeficientului de frecare cu sarcina adimensională și diferite viteze adimensionale



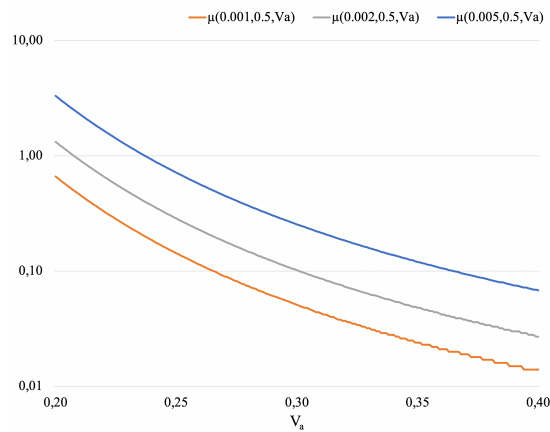


Figura 2.19 Variația componentei de deformare a coeficientului de frecare cu viteza adimensională și diferite sarcini adimensionale

Din Figura 2.19 se observă scăderea componentei de deformare a coeficientului de frecare la creșterea vitezei de alunecare, ceea ce reprezintă o condiție de apariție a fenomenului de stick-slip.

În Figura 2.20, de mai jos, se exemplifică variația presiunii adimensionale dintre deget și penetratorul plan cu muchii drepte pe lungimea contactului.

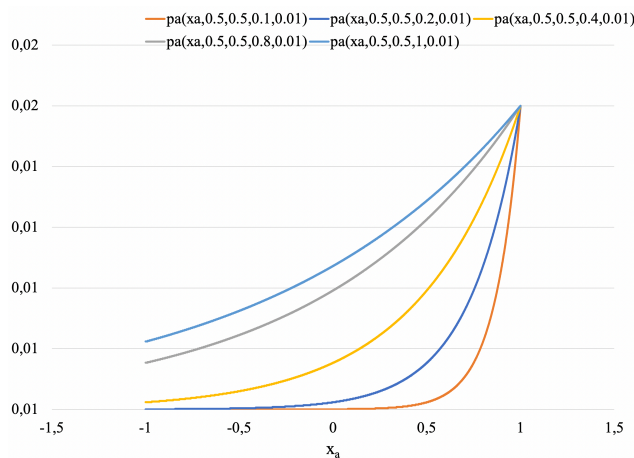


Figura 2.20 Variația presiunii pe lungimea contactului pentru diferite viteze adimensionale  $v_a$

Se observă că la intrarea contactului, presiunea este maximă și este funcție de penetrația relativă.

Cazul poansonului cu profilul plan racordat la capete cu parabole:

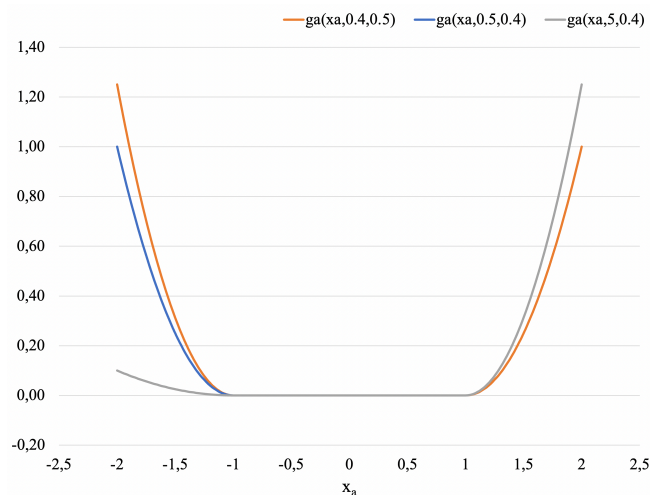


Figura 2.21 Penetrator plan racordat parabolic la capete



În Figura 2.22 se exemplifică distribuția presiunii pe poansonul plan racordat parabolic la ambele capete.

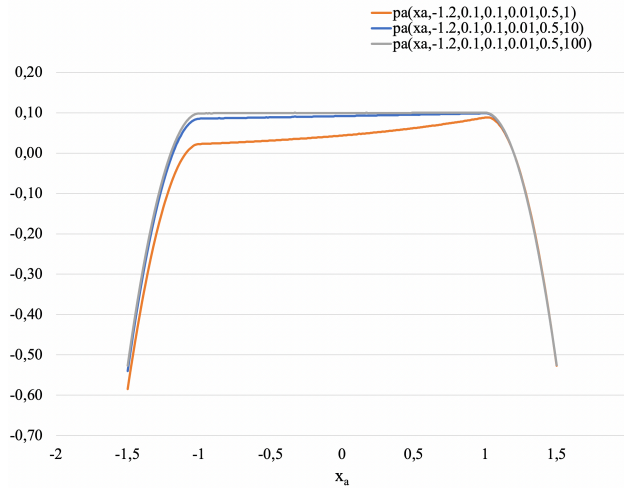


Figura 2.22 Distribuția presiunii pe penetratorul plan racordat parabolic la ambele capete

Efectul vitezei de alunecare dintre poanson și deget asupra presiunii din centrul contactului este prezentat în Figura 2.22.

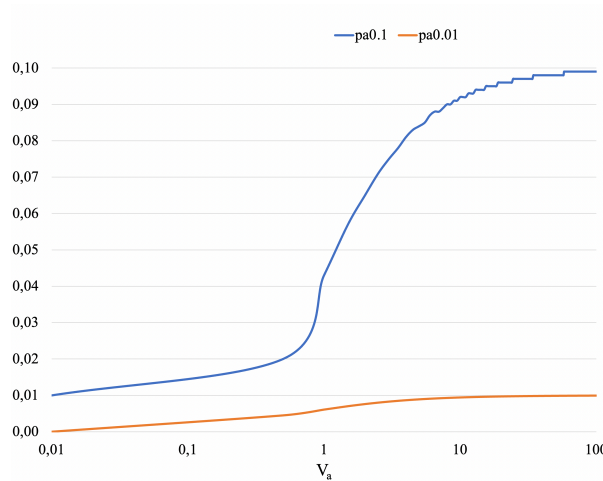
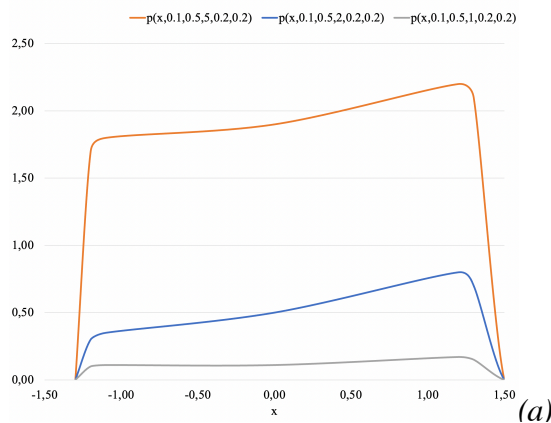


Figura 2.23 Variația presiunii din origine funcție de viteza de alunecare

Se exemplifică în Figura 2.30 variația presiunii  $p$  pe poansonul mobil pentru diferite viteze, penetrații și raze de racordare.





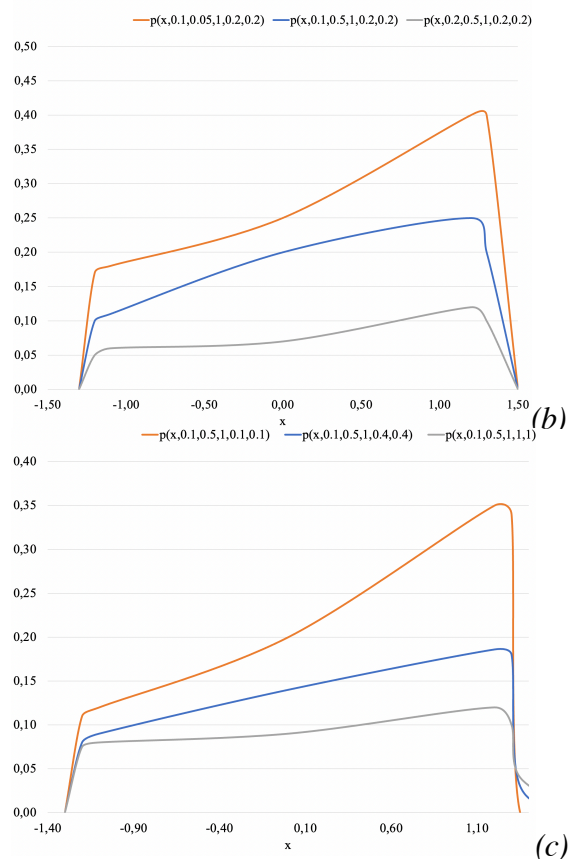


Figura 2.30 Variația presiunii de contact pe poansonul racordat parabolic la capete pentru diferite viteze (a), penetrații (b) și raze de racordare simetrice (c)

Un parametru important pentru starea contactului dintre deget și poansonul plan este viteza de alunecare. În Figura 2.31 se exemplifică variația presiunii în centrul poansonului  $v_u$  viteza, pentru diferite penetrații.

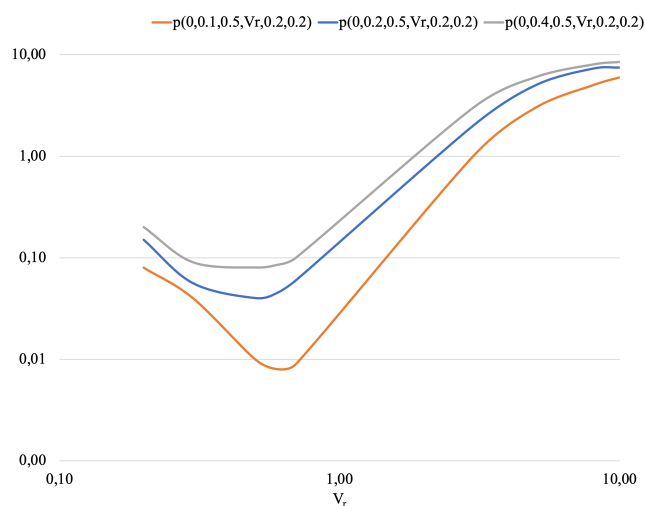


Figura 2.31 Variația presiunii de contact în centrul poansonului cu viteza de alunecare

În continuare este prezentat un model pentru anizotropia pielii umane care ia în calcul patru direcții. Se consideră modelul vâscoelastic al pielii cu comportament anisotropic de tip ortotropic. Acest model permite determinarea caracteristicilor vâscoelastice în orice direcție dacă se cunosc



aceste caracteristici după patru direcții: la  $0^\circ$ , la  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  și la  $135^\circ$ . Modelul de calcul este adaptat după (Khatyr et al. 2004).

Deformația totală se poate exemplifica:

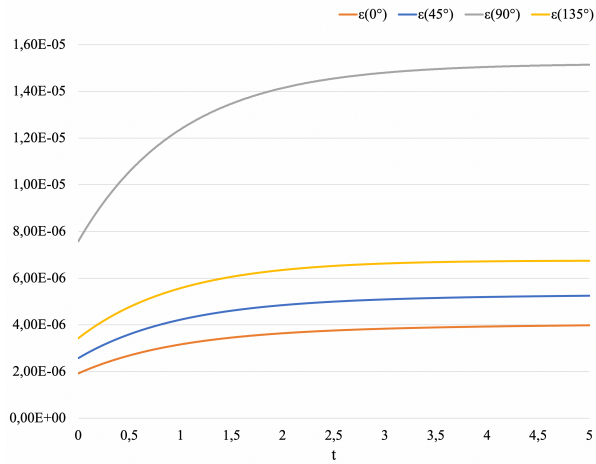


Figura 2.33 Deformația totală  $\varepsilon$  pe diverse unghiuri

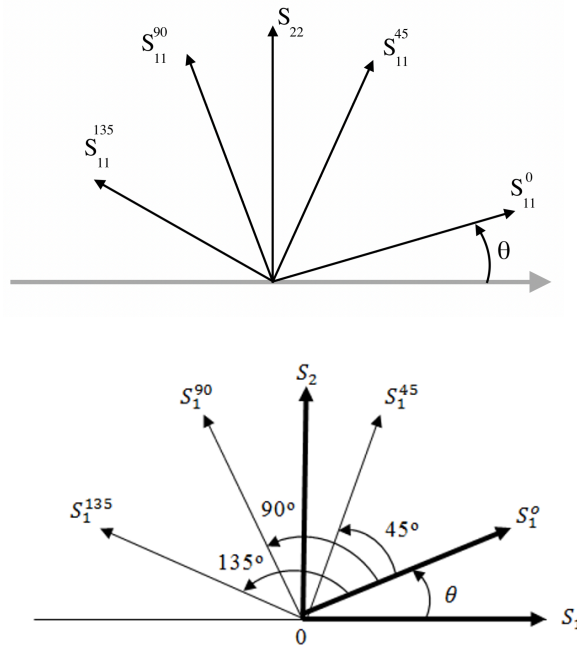


Figura 2.34 Direcțiile de evaluare

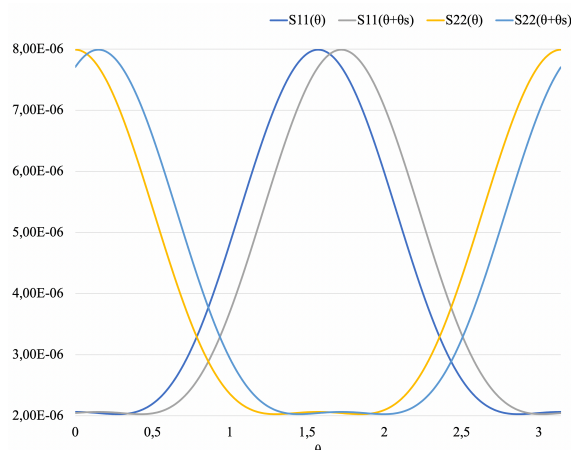


Figura 2.35 Variația coeficienților de flexibilitate cu unghiul aleator,  $\theta$



În **Capitolul 3** este evaluată forma și dimensiunea degetelor, în combinație cu topografia pielii ca fiind printre cei mai importanți factori care contribuie la răspunsul mecanic al contactelor dintre mână și orice obiect. Scopul acestui capitol este de a descrie forma și geometria degetului uman.

Tabelul 3.1 Tabel de dimensiuni medii grupat pe sexe (mm)

Deget	Sex	Lungime (mm)	Deviația standard	Lățime (a)	Deviația standard	Grosime (b)	Deviația standard	Circumferință (mm)
Police (mare)	M	61,98	1,86	24,45	1,38	14,37	2,35	124,02
	F	57,94	5,81	20,08	2,26	12,45	1,62	103,60
Index (arătător)	M	90,45	2,79	19,03	1,78	12,36	2,18	99,74
	F	79,47	1,74	16,38	1,44	10,90	1,85	86,56
Medius (mijlociu)	M	101,73	3,25	20,72	2,13	13,46	2,44	108,60
	F	85,21	1,70	17,61	1,54	11,72	1,91	93,06
Inelar	M	93,35	3,07	17,50	1,56	12,62	2,72	95,24
	F	83,62	2,03	14,96	1,07	9,33	1,19	77,35
Auricular (mic)	M	74,01	2,25	16,09	1,71	10,86	1,71	85,45
	F	63,27	1,83	14,86	1,07	7,79	2,06	72,92
Palmă	M	110,87	4,42	92,45	2,73	-	-	-
	F	94,77	3,86	84,20	2,66	-	-	-
Mână	M	199,15	6,52	-	-	-	-	-
	F	172,89	4,77	-	-	-	-	-

Figura 3.4 de mai jos arată modul în care a fost efectuată măsurătoarea ariei de contact. Se poate observa cum aria reală de contact crește direct proporțional cu forța aplicată.

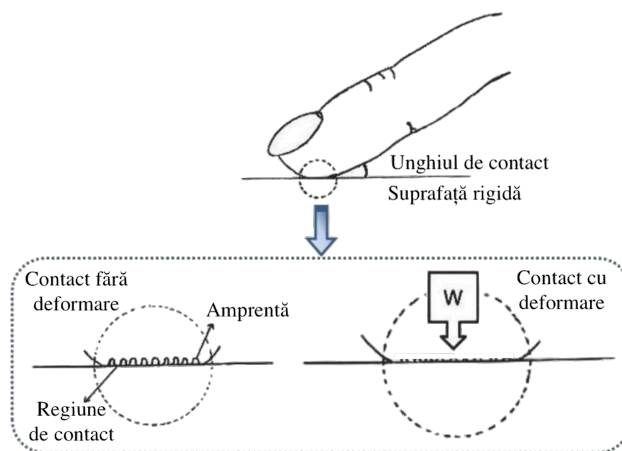


Figura 3.4 Variația ariei de contact cu forța aplicată

Tabelul 3.2 Măsurători experimentale ale ariei decontact dintre degete și o suprafață rigidă

Deget	Sex	Aria medie de contact (mm <sup>2</sup> )
Police (mare)	M	292
	F	274
Index (arătător)	M	143
	F	1,26
Medius (mijlociu)	M	190
	F	165
Inelar	M	175
	F	160
Auricular (mic)	M	130
	F	115



Din nevoia de a avea un model cât mai aproape de realitate pentru a putea efectua simulări complexe ale comportamentului degetului și pielii umane, a fost efectuată o scanare 3D a unui deget arătător.



*Figura 3.5 Model în format .STL al degetului*

Modelul a fost procesat cu ajutorul software-ului Autodesk Fusion 360 Ultimate. Astfel a fost generat un model de studiu de tip solid cu 104.759 elemente de tip TET10 și 152.529 noduri.



*Figura 3.6 Model de studiu de tip solid*

Întrucât articularea falangelor degetelor nu a fost relevantă pentru tema simulărilor, s-a optat pentru un suport rigid continuu care să respecte grosimea țesutului care îmbracă suportul osos al unui deget real. Acest lucru se poate observa în Figura 3.15 de mai jos.



*Figura 3.15 Radiografie a unui deget uman și model pentru suportul rigid*



Mai jos, în figura 3.17, se poate observa starea de deformații la nivelul substratului pielii în cazul indentării cu un penetrator de tip calotă sferică.

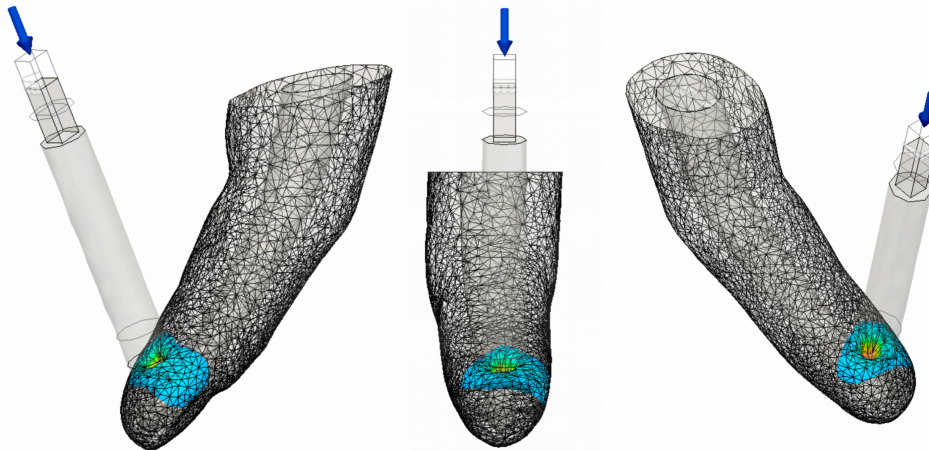


Figura 3.17 Starea de deformații obținută pentru cazul poanson cu diametru de 8 mm și forță 5 N

**Capitolul 4** prezintă studii experimentale pentru determinarea parametrilor de frecare dintre pielea degetului uman și diferite suprafețe artificiale și determinarea caracteristicilor de material ale pielii și substratului.

Fenomenul de stick-slip se referă la vibrația care apare atunci când coeficientul de frecare static este mai mare decât coeficientul de frecare cinetic în cazul deplasărilor relative a două solide aflate în contact. Termenul de stick-slip este derivat din limba engleză, “stick”-lipire “slip”-alunecare. Fenomenul de stick-slip sau vibrație indusă prin frecare este un fenomen care apare la viteze mici și foarte mici. Efectul este de cele mai multe ori nedorit, vibrațiile produse putând deteriora sistemele mecanice sau deranja fonic prin zgomotele de intensitate și frecvență ridicate, dar poate fi, de asemenea, dorit în cazul instrumentelor muzicale cu arcuș cum ar fi vioara. Fenomenul este prezent în cazul frânelor automobilelor, ambreiajelor, și este un generator de erori de poziționare în cazul mașinilor unelte.

Fenomenul de tip stick slip apare, deci, în cazul în care viteza relativă  $v_r$  este mai mică decât valoarea vitezei pentru care alunecarea este stabilă, și depinde și de caracteristicile de rigiditate ale sistemului și de comportamentul frecării celor două materiale în contact (Baumberger, 1995), (Popov, 2010), (Wensrich, 2006). Mișcarea sacadată este condiționată de raportul dintre coeficientul de frecare static  $\mu_s$  și coeficientul de frecare cinetic  $\mu_k$  și apare doar în cazul în care raportul este supraunitar (Gao, și alții, 1994), (Gao, și alții, 1993).

Din lucrarea lui (Baumberger, 1995) se poate observa, în Figura 4.4, cum coeficientul de frecare variază cu viteza.

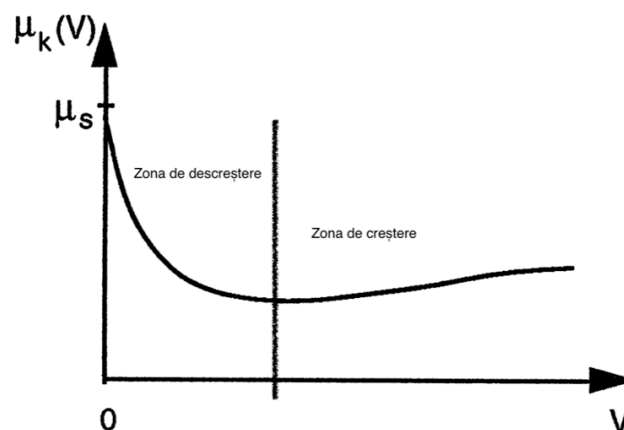


Figura 4.4 Frecarea uscată la viteze mici (Baumberger, 1995)





Au fost realizate experimente pe standul "Stick-Slip" din cadrul Departamentului de Organe de Mașini și Tribologie. Mai jos, în Figura 4.6 se poate vedea, prezentat schematic, standul și se pot observa elementele componente ale standului, împreună cu adaptarea adusă pentru a putea efectua măsurătorile pe degete.

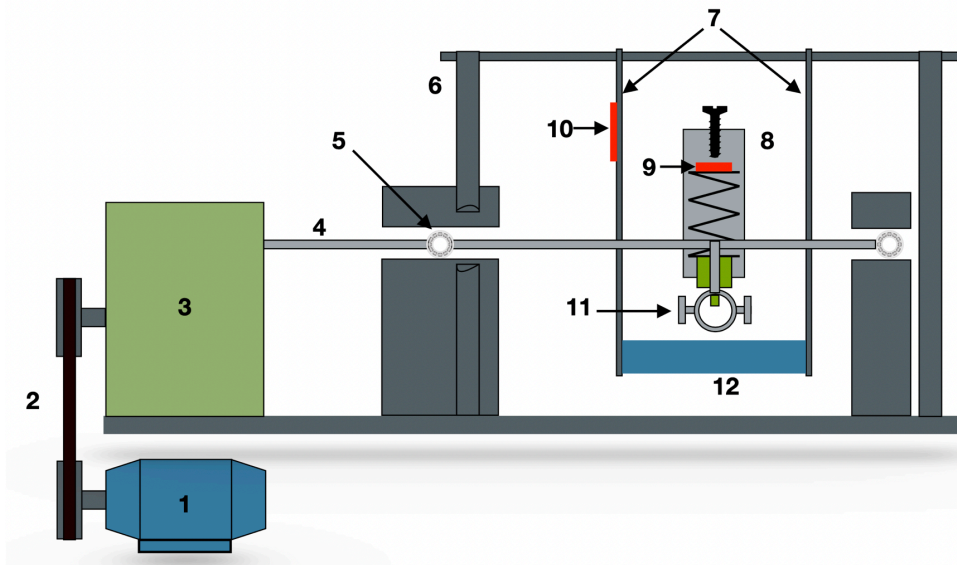


Figura 4.6 Model schematic al standului experimental

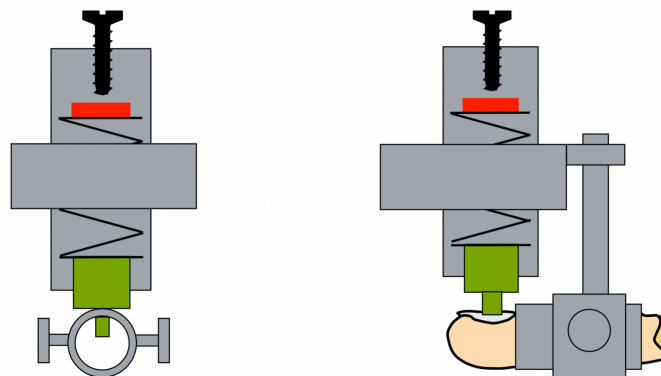


Figura 4.7 Model schematic pentru dispozitivul de imobilizare al degetului

Pentru a rigidiza articulațiile și a imobiliza degetul, a fost folosit un tub din aluminiu iar spațiul dintre tub și deget a fost umplut cu ipsos. Acest lucru poate fi observat în Figura 4.8 de mai jos.



Figura 4.8 Metodă de rigidizare a degetului

Materialele testate au fost oțel, bronz și 3 tipuri de materiale găsite pe interiorul mănușilor de lucru care sunt în contact direct cu pielea umană: piele (origine bovină) și 2 tipuri de textile (bumbac și nylon). Materialele au fost evaluate din punct de vedere al suprafeței folosind profilometrul Surtronic 25 Surface Roughness Tester fabricat de Taylor Hobson Ltd, cu o



Cercetări teoretice și experimentale privind tribologia pielii cu aplicații la prinderea directă și indirectă a obiectelor

rezoluție de  $R_a$  0.01  $\mu\text{m}$  -  $R_z$ , 0.1  $\mu\text{m}$  și o acuratețe de 2%. Vârful palpatorului este un diamant cu o rază a vârfului de 5  $\mu\text{m}$ . Filtrul digital pentru prelucrarea semnalului este de tip Gaussian (ISO 11562). Mai jos, în Figura 4.10, se pot observa atât tipurile de materiale cât și direcția și sensul pe care au fost efectuate măsurătorile.

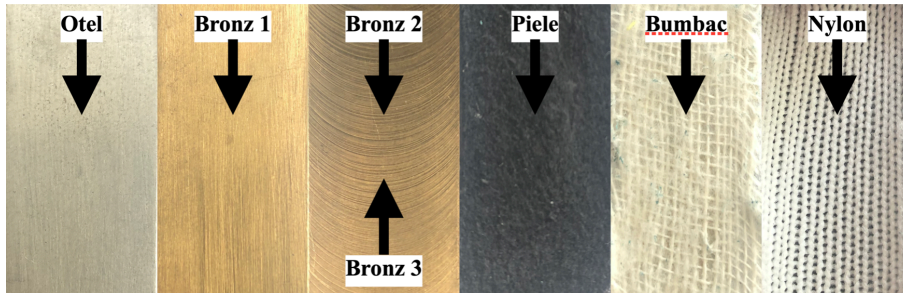


Figura 4.10 Probele de material utilizate în evaluarea coeficientului de frecare, cu indicarea direcției și sensului măsurătorilor

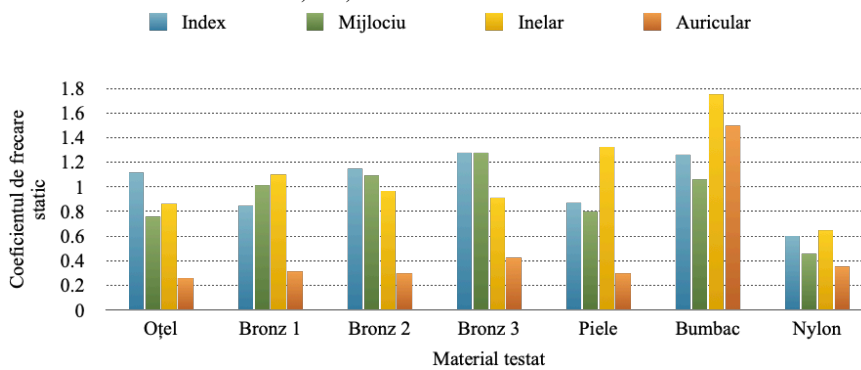


Figura 4.11 Coeficientul de frecare static raportat la materialul testat pentru fiecare deget

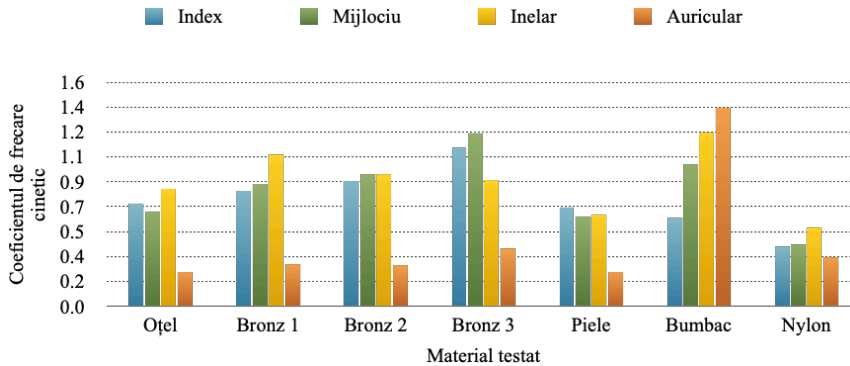


Figura 4.12 Coeficientul de frecare cinetic raportat la materialul testat pentru fiecare deget

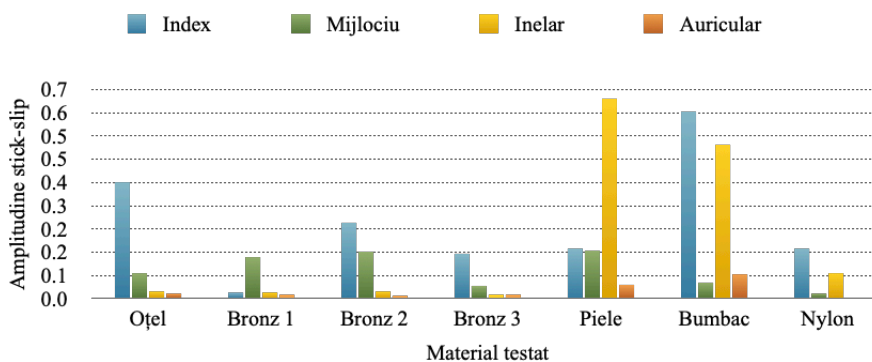


Figura 4.13 Amplitudinea fenomenului de stick-slip



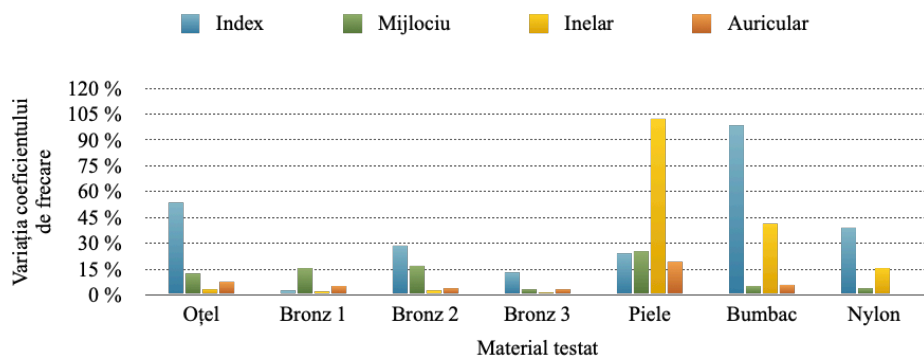


Figura 4.14 Variația coeficientului de frecare

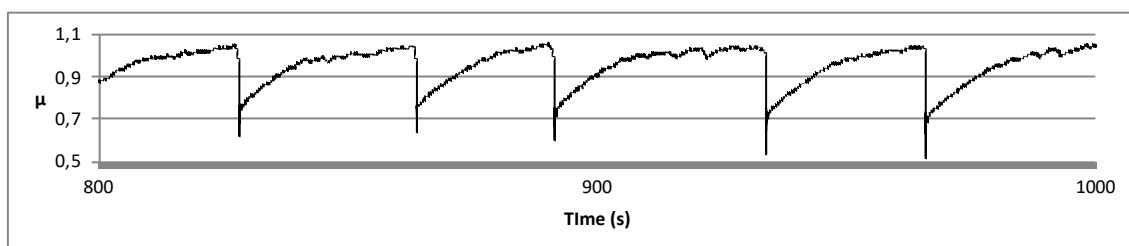


Figura 4.15 Index - Coeficient de frecare pentru oțel

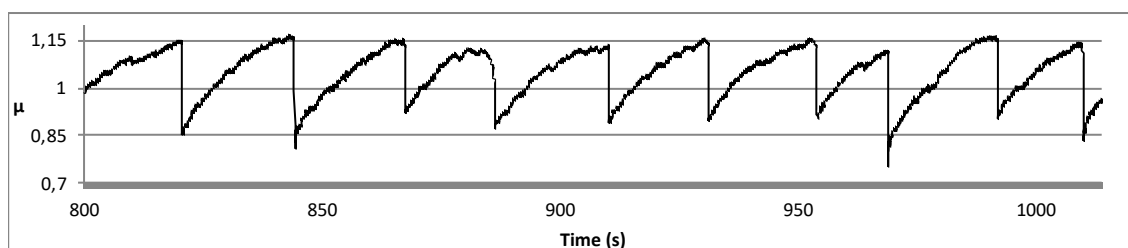


Figura 4.24 Deget mijlociu - Coeficient de frecare pentru bronz 2

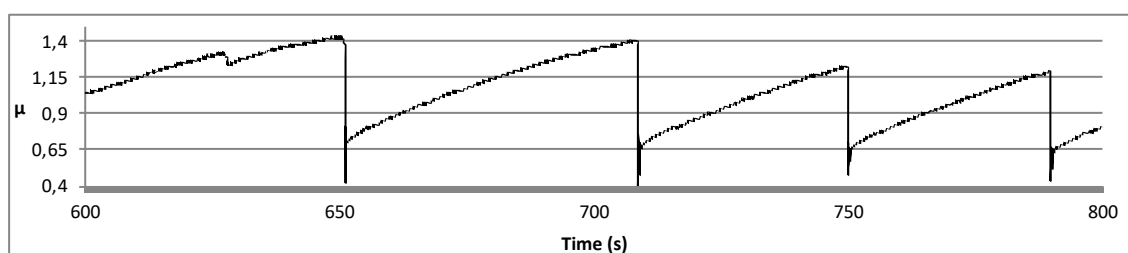


Figura 4.33 Deget inelar - Coeficient de frecare pentru piele

Modelele experimentale au fost dezvoltate și pentru standul CETR (actual Bruker) UMT-2, stand ce permite evaluarea forței de frecare la viteze foarte mici.



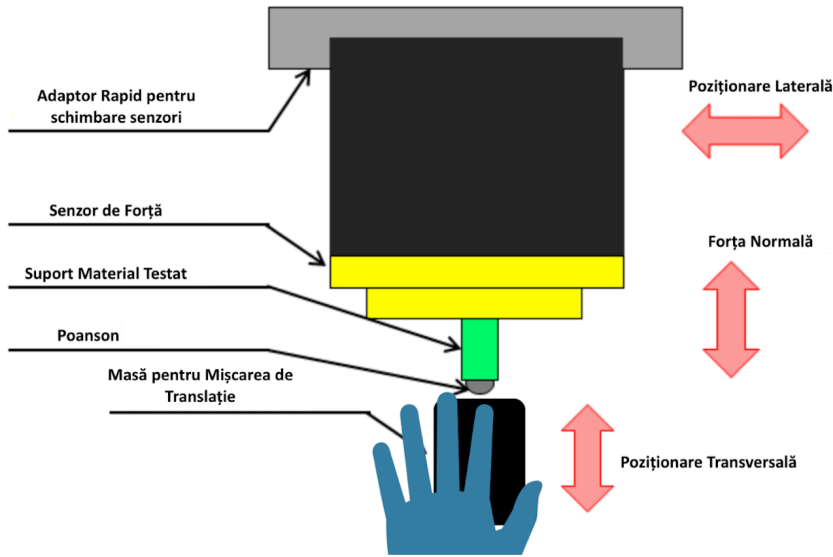


Figura 4.43 Reprezentare schematică a tribometrului UMT-2

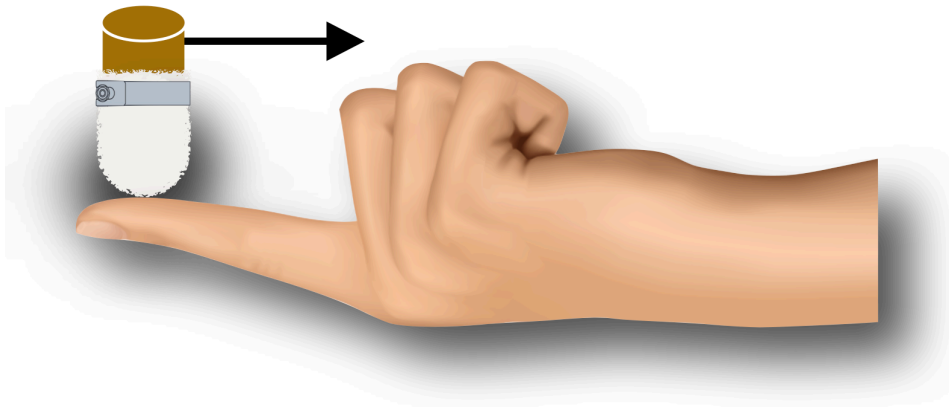


Figura 4.44 Reprezentare schematică a experimentului

Observația cea mai importantă care reiese din experimentele efectuate este identificarea unui așa numit coeficient de frecare la fluaj, care este direct determinat de faza de aplatizare a curbei de stick-slip.

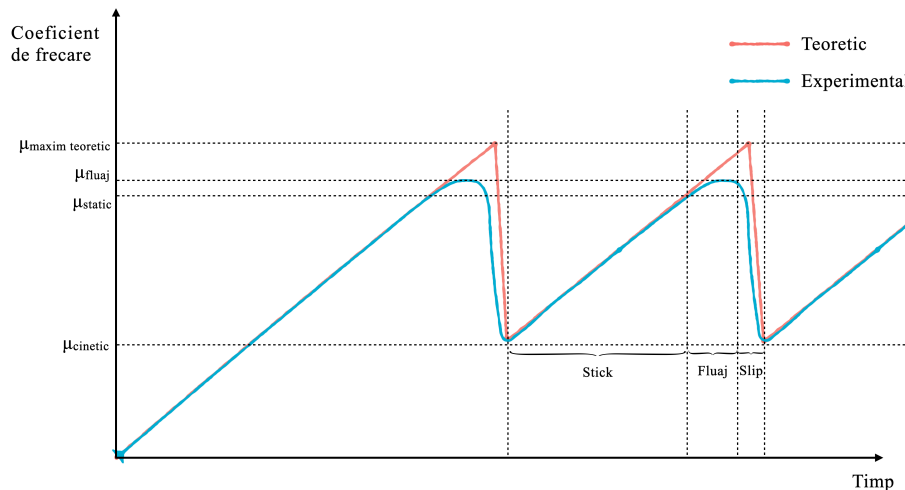


Figura 4.46 Diagrama pentru determinarea coeficienților de frecare



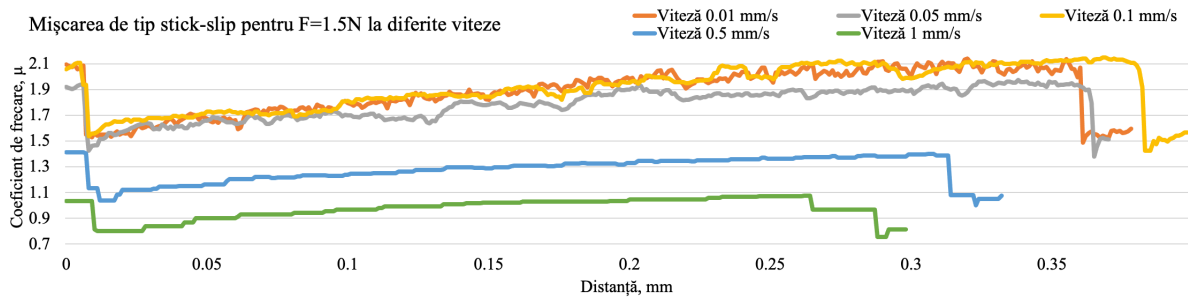


Figura 4.47 Compararea distanței parcurse pentru un ciclu de tip stick-slip pentru o forță de 1,5 N

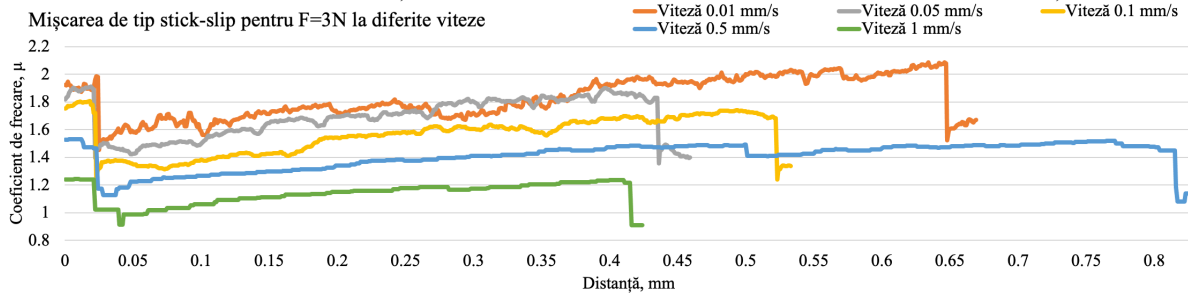


Figura 4.48 Compararea distanței parcurse pentru un ciclu de tip stick-slip pentru o forță de 3 N

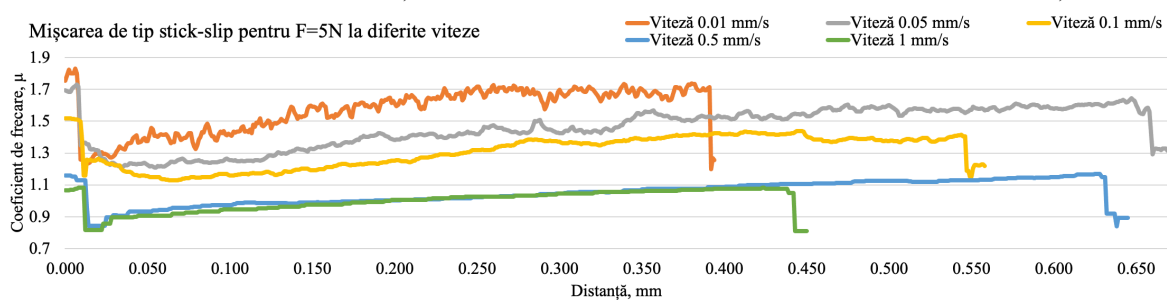


Figura 4.49 Compararea distanței parcurse pentru un ciclu de tip stick-slip pentru o forță de 5 N

Fenomenul de creep poate fi catalogat ca fiind un precursor al alunecării de tip slip (microslip) cu eliberare de energie cu câteva ordine de mărime mai mici decât evenimentul de slip major. Acest fenomen se poate observa foarte clar în inconstanța creșterii coeficientului de frecare la viteze mici și foarte mici. Mai jos, în Figurile 4.49-4.54 sunt evidențiate zonele de microslip care sunt prezente în contextul unui ciclu stick-slip pentru toate forțele la toate vitezele. Au fost expuse zonele de microslip care apar la vitezele de 0,01 mm/s și 0,1 mm/s, dar acest caracter al mișcării sacadate apare la toate vitezele testate.

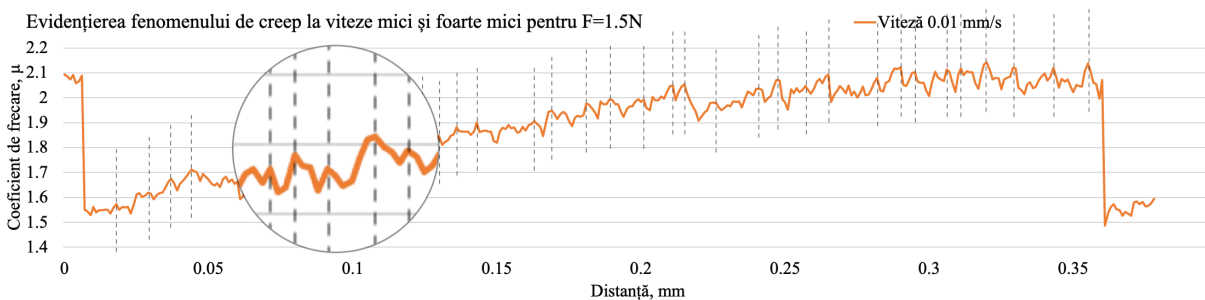


Figura 4.50 Evidențierea fenomenului de creep la  $F=1,5N$  și  $v=0,01$  mm/s

Pentru a determina aria de contact între deget și un poanson rigid s-a utilizat standul experimental CETR-UMT2. Aria de contact a fost determinată cu ajutorul a trei poansoane fabricate din bronz





cilindrice cu terminație sferă cu diametre de 8 mm, 12 mm și 28 mm la trei forțe diferite (1,5 N, 3 N și 5 N).

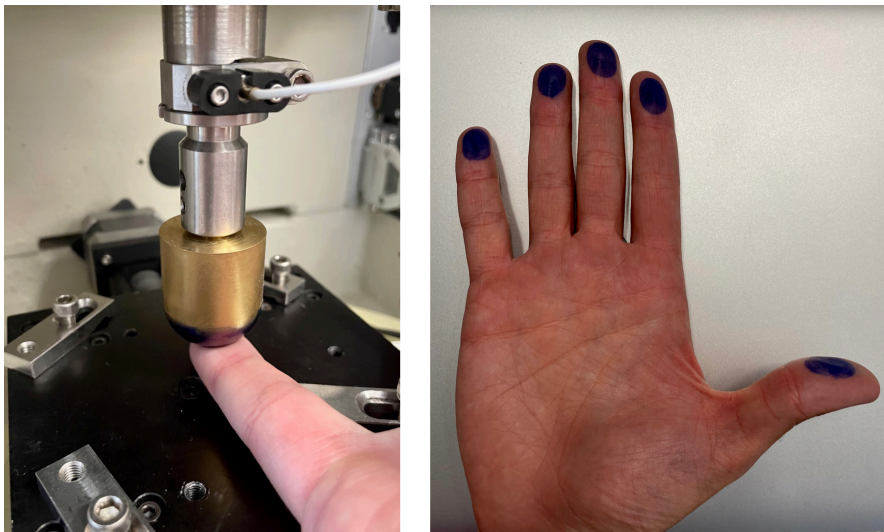


Figura 4.59 Măsurarea ariei de contact cu poanson rigid

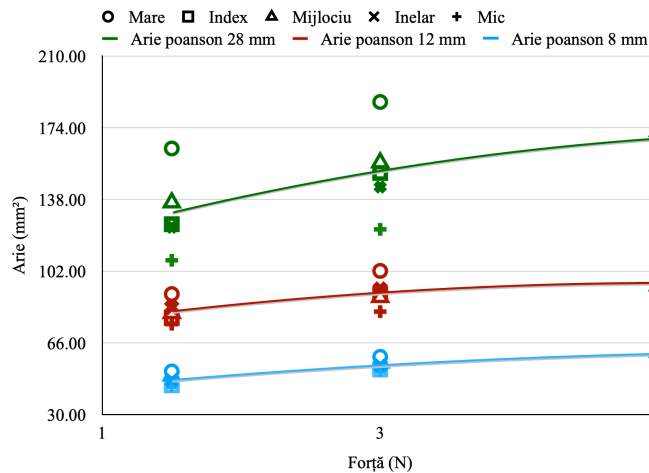


Figura 4.60 Aria de contact determinată pentru degetele umane

Înainte de a dezvolta un model teoretic pentru a descrie un țesut este benefic să se determine proprietățile mecanice generale ale aceluia țesut. Datorită fibrelor din interiorul țesutului care tind să aibă direcții preferate, în funcție de partea corpului pe care se fac experimentele, țesuturile moi au un comportament preponderent anizotrop. Astfel, s-a realizat măsurarea fluajului prin indentare pe standul „CETR-UMT2” și determinarea modulului lui Young pentru pielea degetelor umane și a fost determinat modulul lui Young pentru pielea degetelor umane.

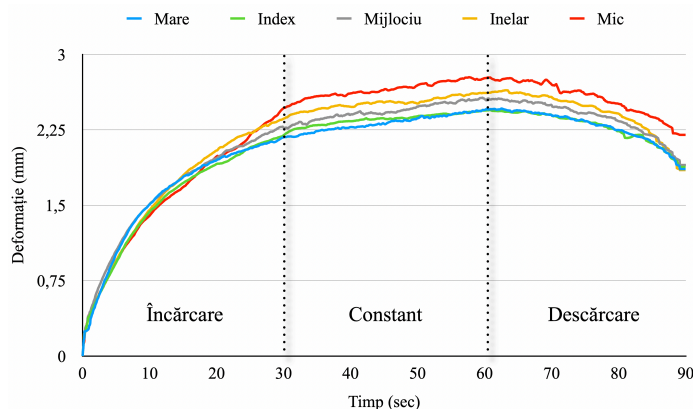


Figura 4.69 Ciclu complet — poanson 8mm, forță 3N



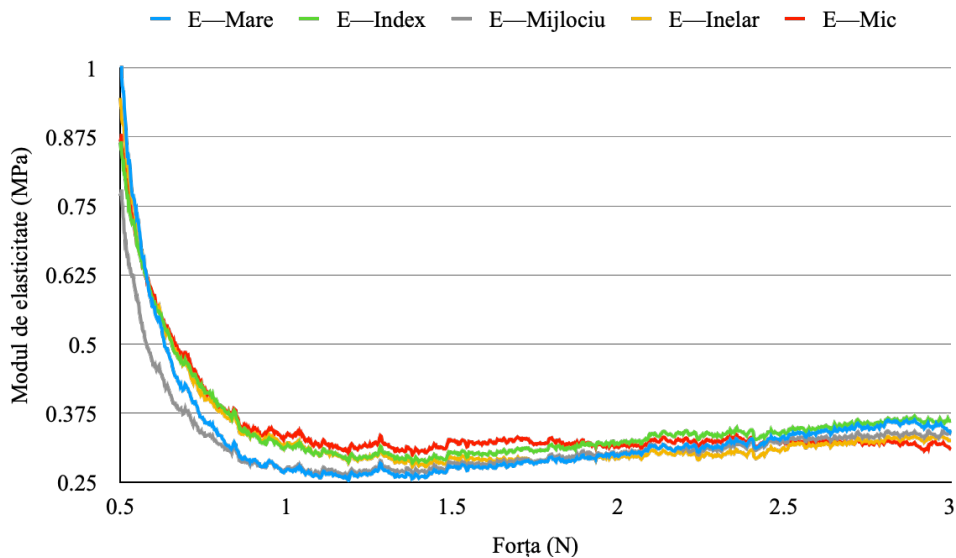


Figura 4.71 Modulul de elasticitate calculat pentru pielea degetelor umane — poanson 8mm

**Capitolul 5** prezintă modelarea teoretică a fenomenului de stick-slip cu includerea fluajului și a stabilității de contact. Modelul teoretic dezvoltat are la bază modelul teoretic propus de (Nakano și Maegawa, 2009a), model care are un singur grad de libertate. Din experimente se poate deduce o legătură de dependență logaritmică dintre coeficientul de frecare și timpul de stick și viteza de antrenare.

$$\mu_s = a_s + b_s \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) = c_s + b_s \ln\left(\frac{D_0}{\tau}\right) \quad \text{Ecuația 5.1}$$

$$c_s = a_s - b_s \ln\left(\frac{\tau_0}{D_0}\right) \quad \text{Ecuația 5.2}$$

unde:

$a_s$  și  $b_s$  sunt factori ai ecuației logaritmice;

$\frac{\tau}{\tau_0}$  reprezintă adimensionalizarea timpului de stick;

$D_0$  este o lungime specifică pentru a normaliza curbele pentru partea cinetică și partea statică pe o scala dublu logaritmică.

Analog, coeficientul de frecare cinetic poate fi exprimat sub forma:

$$\mu_k = a_k - b_k \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) = a_k - b_k x_v \quad \text{Ecuația 5.3}$$

În experimentele prezentate în capitolul anterior, acest coeficient de frecare are valoare coeficientului de frecare cinetic la finele perioadei de slip.

Stick, slip-I și slip-II sunt cele trei tipuri diferite de stări de frecare. Există două tipuri de frecare, frecarea statică  $F_s$  și frecarea cinetică  $F_k$ . Condiția de frecare este determinată de viteza relativă dintre suprafețele aflate în contact:

$$\mu = \begin{cases} F_s \text{ dacă } V - \dot{x} = 0 : \text{stick} \\ F_k \text{ dacă } V - \dot{x} > 0 : \text{slip I} \\ -F_k \text{ dacă } V - \dot{x} < 0 : \text{slip II} \end{cases} \quad \text{Ecuația 5.9}$$



Figura 5.1 Coeficienți de frecare cinetici și de fluaj pe scală logaritmică pentru  $F=5N$

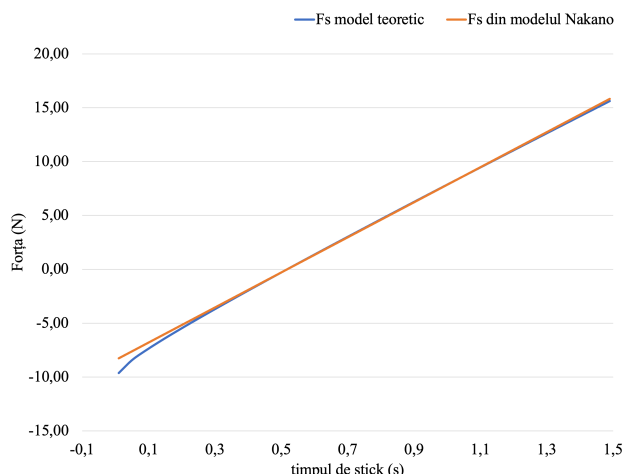


Figura 5.6 Similitudinea între modelul teoretic dezvoltat și modelul dezvoltat de (Nakano și Maegawa, 2009a)

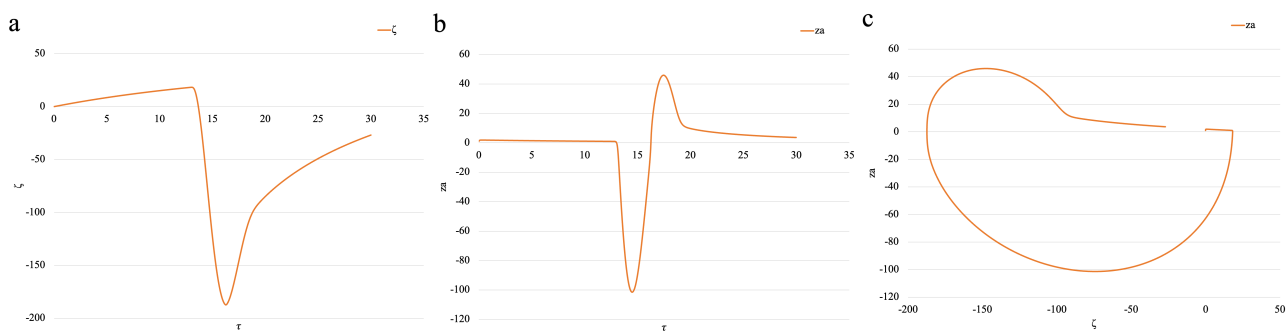


Figura 5.10 (a,b,c) Soluția numerică a parametrilor adimensionali  $\xi$ ,  $z_a$  și  $\tau$  pentru  $\xi' < 1$

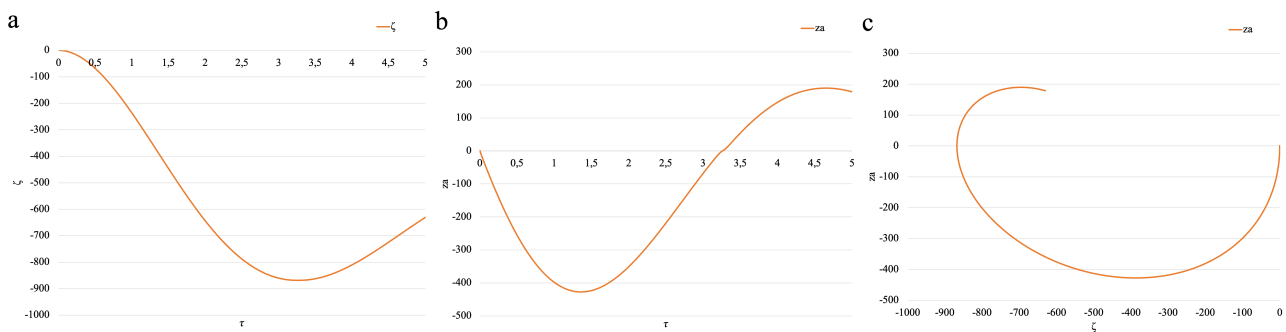


Figura 5.11 (a,b,c) Soluția numerică a parametrilor adimensionali  $\xi$ ,  $z_a$  și  $\tau$  pentru  $\xi' > 1$

Pentru a determina dinamica unui sistem cu frecare, luând în considerare discontinuitatea dintre frecarea statică și cinetică și dependența coeficientului de frecare cinetică de viteza relativă, legea frecării de tip logaritmă utilizată în sistemul prezentat depinde de cinci parametri adimensionali  $(\lambda, \zeta, \gamma, \Delta\lambda, \alpha)$ .

Fenomenul de stick-slip apare cu siguranță într-un sistem cu frecare fără amortizare de tip vâcos. Limita de apariție a fenomenului de stick-slip este produsă de o amortizare vâcoasă, care este controlată de parametrul stick-slip  $(\lambda)$  și parametrul de amortizare  $(\zeta)$ , doi parametri adimensionali.



Experimental s-a observat dependența coeficientului de frecare static,  $\mu_s$ , și a coeficientului de frecare cinetic,  $\mu_k$ , de timpul de stick, de viteză și de forța normală, iar modelul dezvoltat ia în considerare aceste dependențe în dinamica de frecare.

## CONCLUZII GENERALE

- Fenomenele tribologice dintre pielea degetelor umane și obiectele artificiale sunt esențiale pentru prinderea și manipularea obiectelor. Transmiterea forțelor și momentelor prin contactul degetelor cu diverse obiecte se face atât prin formă, cât și prin frecare statică.
- Pentru cunoașterea aspectelor privind interfața piele-deget-obiect, este necesară determinarea presiunii de contact, deformației locale, vitezei relative și a coeficienților de frecare static și cinetic.
- Pielea degetelor umane are un comportament vâscoelastic de tip Hooke-Voigt- Kelvin și se poate caracteriza prin deformații elastice, elastoplastice și după timp îndelungat (de ordinul secundelor și zecilor de secunde), pielea se caracterizează printr-un spectru de tip Voigt-Kelvin.
- Parametrii tribologici esențiali (presiune de contact, deformație, coeficient de frecare) ai contactului degetelor umane cu diferite obiecte depind de viteză, în cazul mișcării relative, și de durata prinderii, în cazul obiectelor fixabile în mână prin intermediul degetelor.
- La viteze relative mici, cazul de inițiere a prinderii sau desprinderii obiectelor, apare fenomenul de stick-slip.

## CONTRIBUȚII

Teza de doctorat aduce următoarele contribuții:

### 1. Pe plan documentar

- Studiu privind evoluția lucrărilor în domeniul biotribologiei;
- Sinteza bibliografică privind tribologia pielii umane;

### 2. Pe plan experimental

- Determinarea geometriei degetelor umane prin adaptarea unui scanner 3D și validarea modelului prin compararea rezultatelor obținute din simulări cu cele experimentale;
- Adaptarea și modificarea dispozitivelor standurilor experimentale "Stick-slip" și CETR-UMT2 pentru studiul frecării degetelor cu diverse materiale sintetice;
- Evidențierea apariției fenomenului de fluaj (creep) la finele fazei de stick și la inițierea fazei de slip;
- Determinarea coeficienților de frecare statici și cinetici dintre pielea degetelor și diverse materiale sintetice și sesizarea dependenței logaritmice de presiunea de contact și de viteză;
- Determinarea ariei de contact dintre vârful degetului și suprafețe rigide;
- Evidențierea experimentală a dependenței coeficientului de frecare static de timpul de staționare;
- Determinarea parametrilor de elasticitate ai pielii degetelor din încercări de penetrare;

### 3. Pe plan teoretic și programe de calcul

- Modele teoretice și programe de calcul în MATCHAD 14, privind starea de tensiuni și deformații la contactul vâscoelastic al degetelor umane cu:



- un plan rigid cu muchii drepte și rotunjite parabolic;
- un cilindru;
- o sferă;
- Modele teoretice concepute includ parametri adimensionali și pot fi utilizate ca niște criterii de similitudine.
- Adaptarea unui model teoretic privind anizotropia pielii degetelor umane și realizarea unui program de calcul.
- Model teoretic și program de calcul privind fenomenul de stick-slip la contactul degetului uman cu diferite suprafețe plane rigide prin luarea în considerație a evoluției coeficienților de frecare și a fazei suplimentare de fluaj (stick-creep-slip).
- Model teoretic și program de calcul privind stabilitatea mișcării degetului pe suprafețe rigide la viteze de alunecare mici și foarte mici.

#### **4. Perspectivele tezei**

- Efectele transpirației și a apei normale asupra parametrilor tribologici ai pielii degetelor umane;
- Optimizarea texturii suprafețelor în vederea creșterii coeficientului de frecare static pentru pielea artificială.
- Compararea parametrilor tribologici ai pielii umane cu pielea artificială în vederea optimizării suprafețelor de prindere a diferitelor obiecte de către roboți.
- Dezvoltarea unui model cu element finit care să încorporeze mai multe detalii și mai mulți parametri determinați experimental.



## Bibliografie selectivă

- 1 **Adams, M, Briscoe, B și Johnson, S. 2007.** *Friction and lubrication of human skin.* s.l. : Tribology Letters, 2007. pg. 239-253. Vol. 26(3).
- 3 **Agache, P și Humbert, P. 2004.** *Measuring the Skin—Non-Invasive Investigations.* Berlin : Physiology, Normal Constants, 2004. Vol. 1.
- 5 **Agache, P, și alții. 1980.** *Mechanical properties and Young's Modulus of human skin in vivo.* s.l. : Archives of Dermatological Research, 1980. pg. 221-232. Vol. 269.
- 7 **Alexander, H și Cook, T H. 1977.** *Accounting for natural tension în mechanical testing of human-skin.* s.l. : Journal of Investigative Dermatology, 1977. pg. 310-314. Vol. 69.
- 8 **Amontons, G. 1699.** *De la résistance causée dans les machines.* Paris : Mémoires de l'Académie royale des sciences, 1699. pg. 257-282. Vol. A12.
- 16 **Bader, D și Bowker, P. 1983.** *Mechanical characteristics of skin and underlying tissues in vivo.* s.l. : Biomaterials, 1983. pg. 305-308. Vol. 4.
- 17 **Barel, A O, Courage, W și Clarys, P. 1995.** *Suction method for measurement of skin mechanical: the Cutometer.* s.l. : Handbook of Non-Invasive Methods and the skin. Boca Raton, CRC Press, 1995. pg. 335-340.
- 19 **Baumberger, T. 1995.** *Dry friction Dynamics at low velocities.* s.l. : Physics of Sliding Friction, Springer, 1995.
- 28 **Brown, I A. 1973.** *Scanning electron-microscope study of effects of uniaxial tension on human skin.* s.l. : British Journal of Dermatology, 1973. pg. 383-393. Vol. 89.
- 32 **Cheng, L, Xia, X, Yu, W, Scriven. L E, Gerberich, W W. 1999,** *Flat-Punch Indentation of Viscoelastic Material. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, Vol. 38, 10–22 (2000) © 2000 John Wiley & Sons, Inc.*
- 39 **Cua, A B, Wilhelm, K P și Maibach, H I. 1990.** *Frictional properties of human skin: relation to age, sex and anatomical region, stratum corneum hydration and transepidermal water loss.* s.l. : British Journal of Dermatology, 1990. Vol. 123(4).
- 41 **Dawson, D și Wright, V. 1973.** *Bio-tribology, in: Proceeding of the Conference on the Rheology of Lubrication.* London : The Institute of Petroleum, The Institution of Mechanical Engineers, and the British Society of Rheology, 1973. pg. 81-88.
- 47 **Derjaguin, B V, Muller, V M și Toporov, Y P. 1975.** *Effect of contact deformations on the adhesion of particles.* s.l. : Journal of Colloid and Interface Science, 1975. pg. 314-326. Vol. 52(2).
- 49 **Derler, S, și alții. 2014.** *Microscopic contact area and friction between medical textiles and skin.* s.l. : Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2014. pg. 114-125. Vol. 38.
- 54 **Diridollou, S, și alții. 2020.** *n vivo model of the mechanical properties of the human skin under suction.* s.l. : Skin Research and Technology, 2020. pg. 214-221. Vol. 6.



- 58 **Escoffier, C, și alții. 1989.** *Age-related mechanical properties of human skin: An in vivo study.* s.l. : The Journal of Investigative Dermatology, 1989. pg. 353-357. Vol. 93.
- 65 **Gao, C, Kuhlmann-Wilsdorf, D și Makel, D D. 1994.** *The dynamic analysis of stick-slip motion.* s.l. : Wear, 1994. pg. 1-12. Vol. 173(1).
- 66 **Gao, C, Kuhlmann-Wilsdorf, D și Makel, D. 1993.** *Fundamentals of stick-slip.* s.l. : Wear, 1993. pg. 1139-1149. Vol. 162.
- 71 **Gerhard, H și Vogel, M D. 1981.** *Directional variations of mechanical parameters în rat skin depending on maturation and age.* s.l. : The Journal of Investigative Dermatology , 1981. pg. 493-497. Vol. 76.
- 72 **Gerhardt, L C, și alții. 2008.** *Influence of epidermal hydration on the friction of human skin against textiles.* s.l. : Journal of the Royal Society Interface, 2008. pg. 1317-1328.
- 76 **Goryacheva, I G și Makhovskaya, Y Y. 2010.** *Modeling of friction at different scale levels.* s.l. : Modeling of friction at different scale levels, 2010. pg. 390-398. Vol. 45(3).
- 77 **Grahame, R. 1969.** *Elasticity of human skin in vivo.* s.l. : Annals of physical medicine, 1969. pg. 130-134. Vol. 10.
- 93 **Jacquet, E, și alții. 2008.** *A new experimental method for measuring skin's natural tension.* s.l. : Skin Research and Technology, 2008. pg. 1-7. Vol. 14.
- 97 **Johnson, K L și Greenwood, J A. 1997.** *An adhesion map for the contact of elastic spheres.* s.l. : Journal of Colloid and Interface Science, 1997. pg. 326-333. Vol. 192(2).
- 104 **Khatyr, F, Imberdis, C, Vescovo, P, Varchon, D, Lagarde, JM.** *Model of the viscoelastic behaviour of skin in vivo and study of anisotropy,* Skin Research and Technology 2004; 10: 96–103
- 123 **Lui, Z și Yeung, K. 2008.** *The preconditioning and stress relaxation of skin tissue.* s.l. : Journal of Biomedical and Pharmaceutical Engineering, 2008. pg. 22-28. Vol. 3.
- 131 **Matsumura, H, și alții. 2001.** *Preconditioning of the distal portion of a rat random-pattern skin flap.* s.l. : British Journal of Plastic Surgery, 2001. pg. 58-61. Vol. 54.
- 140 **Mosteller, RD. 1987.** *Simplified calculation of body-surface area,* N Engl J Med. 1987 Oct 22;317(17):1098. doi: 10.1056/NEJM198710223171717. PMID: 3657876.
- 144 **Nakano K, Maegawa S. 2009a** „*Occurrence limit of stick-slip: dimensionless analysis for fundamental design of robust-stable systems*”, *Lubr. Sci.*, vol. 22, pp. 1-18.
- 162 **Pereira, J M, Mansour, J M și Davis, B R. 1991.** *Dynamic measurement of the viscoelastic properties of skin.* s.l. : Journal of Biomechanics, 1991. pg. 157-162. Vol. 24.
- 164 **Baumberger, T. 1995.** *Dry friction Dynamics at low velocities.* s.l. : Physics of Sliding Friction, Springer, 1995.
- 169 **Richard LG. 2017.** *Human Skin Is the Largest Epithelial Surface for Interaction with Microbes,* Journal of Investigative Dermatology, Volume 137, Issue 6, 2017, Pages 1213-1214, ISSN 0022-202X
- 171 **Sanders, R. 1973.** *Torsional Elasticity of Human Skin in-Vivo.* s.l. : Pflugers Archiv-European Journal of Physiology, 1973. pg. 255-260. Vol. 342.





- 175 **Soldatenkov, I. A., 2008**, *Calculation of the Deformation Component of the Force of Friction for a Standard Elastoviscous Base, ISSN 1068-3666, Journal of Friction and Wear, 2008, Vol. 29, No. 1, pp. 7–14.*
- 179 **Stark, H L. 1977**. *Directional variations în the extensibility of human skin.* s.l. : British Journal of Plastic Surgery, 1977. pg. 105-114. Vol. 30.
- 182 **Tabor, D. 1977**. *Surface forces and surface interactions.* s.l. : Journal of Colloid and Interface Science, 1977. pg. 2-13. Vol. 58(1).
- 203 **Wensrich, C. 2006**. *Slip-stik motion in harmonic oscillation chain subject to Coulomb friction.* s.l. : Tribology International, 2006. pg. 490-495. Vol. 39.

