



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



Милан (Тихомир) Николић

**ПРИЛОГ ИСТРАЖИВАЊУ УТИЦАЈА
ХИСТЕРЕЗИСА ГУМЕ НА
КОЕФИЦИЈЕНТ ТРЕЊА КЛИЗАЊА У
КОНТАКТУ ОБУЋЕ И ПОДА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2025.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Milan (Tihomir) Nikolić

**THE CONTRIBUTION TO THE
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF
RUBBER HYSTERESIS ON THE
COEFFICIENT OF SLIDING FRICTION IN
THE CONTACT BETWEEN FOOTWEAR
AND THE FLOOR**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор: др Милан Банић ванредни професор Машински факултет,
Универзитет у Нишу

Наслов: Прилог истраживању утицаја хистерезиса гуме на коефицијент
трења клизања у контакту обуће и пода

Резиме:

У овој дисертацији је истраживан утицај хистерезиса гуме за израду ђонова обуће на коефицијент трења у контакту обуће и подлоге. Поред експерименталних испитивања коришћене су и нумеричке методе (регресија и Тагучи метод) за анализу резултата и дефинисања утицаја одређених параметара на коефицијент трења. Развијена је и вештачка неуронска мрежа која на основу вредности хистерезиса гуме и других утицајних параметара предвиђа коефицијент трења између обуће и пода. За потребе експерименталног одређивања коефицијента трења конструисан је и специјални испитни сто са могућностима испитивања у различитим условима и са варијацијом параметара (брзина клизања, нормално оптерећење, различите врсте подлоге, стање подлоге, храпавост).

За потребе одређивања коефицијента трења вршена су и експериментална испитивања одређивања хистерезиса гумених смеша коришћених у експерименту, одређивање тврдоће гуме као мерење храпавости гранитних плоча по којима је вршено клизање узорака од гуме.

Експерименти показују да се утицај тврдоће гуме на коефицијент трења не може посматрати одвојено без хистерезиса. Већа одступања у коефицијенту трења (до 18 пута) код глатке плоче указују на то да је код ње утицај хистерезиса мањи услед доминантног утицаја адхезије на коефицијент трења. Код антислип плоче, која има знатно већу храпавост у односу на глатку плочу, одступања су мања (до 3 пута) јер је утицај хистерезиса на коефицијент трења већи услед деформација које настају током кретања гуме по храпавој површини.

Научна област:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина:	Машинске конструкције
Кључне речи:	Трење гуме, хистерезис, коефицијент трења, трење ђона ципеле, регресија, Тагучи метод
УДК:	539.389.4 (043.3) 685.341.364 (043.3) 531.44 (043.3)
CERIF класификација:	T210
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral
Supervisor:

Dr Milan Banić, assistant professor, Mechanical Faculty, University of Niš

Title:

The contribution to the investigation of the influence of rubber hysteresis on the coefficient of sliding friction in the contact between footwear and the floor

Abstract:

This dissertation investigates the influence of rubber hysteresis, used for manufacturing shoe soles, on the coefficient of friction in contact between footwear and floor. In addition to experimental testing, numerical methods (regression and the Taguchi method) were employed to analyze the results and define the influence of certain parameters on the coefficient of friction. An artificial neural network was also developed to predict the coefficient of friction between footwear and the floor based on the hysteresis values of rubber and other influencing parameters.

For the purpose of experimental determination of the coefficient of friction, a special testing table was designed, capable of testing under various conditions and with parameter variations (sliding speed, normal load, different types of surfaces, surface conditions, roughness). Experimental investigations included determining the hysteresis of the rubber compounds used in the tests, measuring the hardness of the rubber, and assessing the roughness of granite plates on which the rubber samples were slid.

The experiments indicate that the influence of rubber hardness on the coefficient of friction cannot be considered separately from hysteresis. Larger variations in the coefficient of friction (up to 18 times) on smooth plates suggest that hysteresis has a smaller influence due to the dominant role of adhesion in determining the coefficient of friction. On anti-slip plates, which are significantly rougher than smooth plates, variations are smaller (up to 3 times) because hysteresis has a greater

	impact on the coefficient of friction due to the deformations caused by the movement of the rubber over the rough surface.
Scientific Field:	Mechanical engineering
Scientific Discipline:	Mechanical design
Key Words:	rubber friction, hysteresis, friction coefficient, shoe sole rubber, regression, Taguchi method
UDC:	539.389.4 (043.3) 685.341.364 (043.3) 531.44 (043.3)
CERIF Classification:	T210
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

ЗАХВАЛНОСТ

За стално подстицање, позитивну радну енергију, многобројне стручне разговоре, коментаре, савете и сугестије од непроцењиве важности захваљујем се свом ментору, проф. др Милану Банићу. Велику захвалност дугујем и проф. др Душану Стаменковићу који ме је увео свет науке, пружио подршку, пратио моје научно сазревање и у њему имао веома значајну улогу до самог завршетка. Захвалност дугујем и проф. др. Мирославу Ђурђановићу који ми је усадио љубав према Трибологији на часовима основних студија. Посебним ангажовањем и пружањем помоћи у извођењу експерименталног истраживања значајан допринос мојој дисертацији дао је проф. др Никола Коруновић. Такође се захваљујем проф. др Александру Милтеновићу и Милошу Симоновићу на саветима и корисним сугестијама при коначном обликовању доктората. Важну улогу на овом истраживачком путу имали су и колеге са факултета Драган Јовановић и лаборант Марко Тонић. Захваљујем се и колегама са Академије техничко-васпитачких струковних студија на сталан подстицај и разумевање на овом изазовном путу.

Значајан допринос реализацији истраживања приказаних у оквиру докторске дисертације дала је и компанија „ТИГАР техничка гума” која израдила узорке и тиме омогућила експериментални део дисертације.

Нека ми не замере они чија имена овом приликом нису могла бити поменута, што никако не умањује њихов велики допринос у захтевном, али врло подстицајном процесу стварања докторске дисертације која је пред вама.

На крају, свакако да највећу захвалност заслужује моја породица без чијег разумевања, подршке и одрицања ова дисертација не би била могућа.

САДРЖАЈ

1.	УВОД.....	1
1.1	Предмет истраживања	1
1.2	Циљ истраживања	3
1.3	Методологија истраживачког рада	4
1.4	Структура рада	5
2.	Триболошке карактеристике гуме	7
2.1	Основне теорије о трењу	7
2.1.1	Адхезиона теорија трења	7
2.1.2	Молекуларно-механичка теорија трења.....	9
2.1.3	Енергетска теорија трења	10
2.2	Гума и њене триболошке карактеристике	11
2.2.1	Структура гуме	11
2.2.2	Вискоеластични модели материјала.....	14
2.2.3	Хистерезис гуме	17
2.2.4	Механизми трења вискоеластичних тела по чврстој подлози	23
2.3	Трење између обуће и подлоге	30
2.3.1	Основни триболошки параметри у контакту обуће и пода.....	31
2.3.2	Триболошка мерења код обуће и пода.....	34
2.3.3	Основни принципи мерења отпорности на клизање обуће и подлоге	35
3.	Преглед истраживања у области триболошких карактеристика гуме	40
4.	Експериментална истраживања	50
4.1	Одређивање тврдоће гуме узорака за испитивање.....	50
4.2	Одређивање хистерезиса гуме	51
4.3	Мерење храпавости плоча	53
4.4	Експериментално одређивање коефицијента трења	57
4.4.1	Анализа експерименталних резултата	62
5.	Регресиона анализа	69
5.1.1	Проста (једнострука) регресиона анализа.....	70
5.1.2	Вишеструка регресиона анализа.....	71
6.	Резултати анализе помоћу Тагучи метода	77

7.	Предвиђање коефицијента трења применом неуронске мреже.....	84
7.1	Неуронске мреже.....	84
7.2	Прикупљање и обрада података за предвиђање вредности коефицијента трења	91
8.	Закључак и правци даљег истраживања	97
9.	Литература	101

СПИСАК СЛИКА

Слика 1.1 Методологија истраживања и процедуре	4
Слика 2.1 Магма-плазмени модел трења Тисена: 1 – трибомисија; 2 – нормална структура материје; 3 – плазма; 4 – формирање и кретање дислокација	10
Слика 2.2 Полимерни ланци гуме [5]	13
Слика 2.3 Шематски приказ Максвеловог и Војтовог модела вискоеластичности [20].	15
Слика 2.4 Хистерезисна петља узорка гуме OB2280.....	18
Слика 2.5 Осцилограф	19
Слика 2.6 Јерзлијев хистерезис	19
Слика 2.7 Хистерезисна петља после 10 циклуса (пуна линија) код гуме која садржи 50 делова појачаване са чађи (лево) и 50 делова непојачаване са чађи (десно) [23].....	21
Слика 2.8 Хистерезисна петља првог циклуса за природну гуму која се истеже до различитих деформација	22
Слика 2.9 Утицај вискоеластичних деформација и реалне величине контакта на коефицијент трења у зависности од брзине клизања [31]	24
Слика 2.10 Механизам адхезионог трења.....	24
Слика 2.11 Дисипација вискоеластичне енергије између стаклене кугле и гуме [32] ...	25
Слика 2.12 Шема уређаја за мерење адхезије између гуме и стаклене кугле [32].....	26
Слика 2.13 Уређај за тестирање адхезије [32]	26
Слика 2.14 Распоред притиска на неравнинама пута	27
Слика 2.15 Однос напрезања и деформације без (а) и са хистерезисом (б)	28
Слика 2.16 Механичка аналогија вискоеластичног контакта [26]	28
Слика 2.17 Вискоеластична деформација гуме због неравнина површинске храпавости подлоге на две различите скале дужина [25].....	29
Слика 2.18 Гума у контакту са тврдом подлогом и храпавом површином [31].....	33
Слика 2.19 Пример трибометра за тестирање	37
Слика 2.20 Опрема за тестирање отпорности на клизање обуће.....	38
Слика 2.21 Пендулум трибометар	38
Слика 2.22 Рамп тест.....	39
Слика 3.1 Уређај за припрему узорака [39]	40
Слика 3.2 Уређај за одређивање коефицијента трења [39]	41
Слика 3.3 Опрема (САТРА) за тестирање коефицијента трења на тениској подлози [40]	42

Слика 3.4 (лево) Ђон текстуре у облику рибе кости, (центар, десно) раван ђон од гуме [40]	43
Слика 3.5 Контакт гуме и подлоге за исту нормалну силу. (а) површина веће храпавости смањује реалну површину контакта (б) површина мање храпавости повећава реалну површину додира [40].....	43
Слика 4.1 Тврдомер Тип А [64]	50
Слика 4.2 Мерно место тестирања хистерезиса гуме	51
Слика 4.3 Дијаграм кондиционирања узорка	52
Слика 4.4 Узорци гуме за мерење хистерезиса	53
Слика 4.5 Мерно место за одређивање храпавости гранитних плоча.....	54
Слика 4.6 Графички приказ средњег аритметичког одстојања профила R_a [12]	55
Слика 4.7 Графички приказ средње висине неравнина R_z храпавости [66].....	55
Слика 4.8 2D запис мерења храпавости глатке плоче уређајем Mitutoyo SurfTest SJ-301	56
Слика 4.9 Склоп клизача [67].....	57
Слика 4.10 Распоред клизача од гуме [67].....	58
Слика 4.11 Шематски приказ мерног места за одређивање коефицијента трења	59
Слика 4.12 Мерно место (Трибометар) за одређивање коефицијента трења.....	59
Слика 4.13 3D модел трибометра	60
Слика 4.14 Трибометар са уређајем за промену нормалне силе	61
Слика 4.15 Дијаграм коефицијента трења	63
Слика 4.16 Дијаграм коефицијента трења	63
Слика 4.17 Коефицијент трења између гуме и противклизне тј. глатке плоче у зависности од хистерезиса гуме на сувом	65
Слика 4.18 Коефицијент трења између гуме и противклизне тј. глатке плоче у зависности од хистерезиса гуме на влажном	66
Слика 4.19 Коефицијент трења између гуме и противклизне тј. глатке плоче у зависности од хистерезиса гуме на сапуници	66
Слика 5.1 Пример линеарне и нелинеарне зависности променљивих.....	69
Слика 6.1 Главни ефекти коефицијента трења (суво, влажно, сапуница).....	81
Слика 6.2 Главни ефекти коефицијента трења (влажно, сапуница).....	82
Слика 7.1 Неурон [77].....	86
Слика 7.2 Изглед вештачке неуронске мреже [78]	88
Слика 7.3 Изглед вештачког неурона.....	89

Слика 7.4 Шема неуронске мреже.....	92
Слика 7.5 Средња квадратна грешка током процеса обуке вештачке неуронске мреже за предвиђање коефицијента кинетичког трења.....	92
Слика 7.6 Резултати перформанси мреже за скупове података за обуку, валидацију и тестирање (кинетичко трење).....	93
Слика 7.7 Предвиђени и измерени кинетички коефицијент трења.....	94
Слика 7.8 Средња квадратна грешка током процеса обуке вештачке неуронске мреже за предвиђање коефицијента статичког трења	95
Слика 7.9 Резултати перформанси мреже за скупове података за обуку, валидацију и тестирање (статичко трење).	95
Слика 7.10 Предвиђени и измерени статички коефицијент трења	96

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1 Понашање вискоеластичних елемената [18] [19].....	16
Табела 2.2 Принципи за одређивање коефицијента трења	36
Табела 4.1 Измерене вредности тврдоће узорака.....	51
Табела 4.2 Карактеристике гумене смеше	53
Табела 4.3 Измерене хrapавости глатке плоче.....	56
Табела 4.4 Измерене хrapавости противклизне плоче	56
Табела 4.5 Коефицијент трења по противклизној плочи	63
Табела 4.6 Коефицијент трења на глаткој плочи	64
Табела 5.1 Регресиона анализа податка свих мерења.....	72
Табела 5.2 Корелација улазних променљивих са регресионим методом	74
Табела 5.3 Регресиони подаци за противклизну плочу (влажно, сапуница).....	74
Табела 5.4 Регресиони подаци за глатку плочу (влажно, сапуница).....	75
Табела 6.1 Табела одговора за средње вредности (суво, влажно, сапуница).....	83
Табела 6.2 Табела одговора за средње вредности (влажно, сапуница).....	83
Табела 7.1 Вредности предвиђеног и измереног кинетичког коефицијента трења μ_k	94
Табела 7.2 Вредности предвиђеног и измереног статичког μ_k	96

1. УВОД

1.1 Предмет истраживања

Клизања и падови приликом ходања представљају веома значајан истраживачки изазов јер су према подацима најчешћи узрок повреда. Повреде услед падова и клизања изазивају и велике трошкове за медицинско лечење и боловање. Према [1] клизање је узрок 40-50% свих падова. У Европи, око 15-20% свих забележених несрећа на радном месту које доводе до одсуства с посла дуже од 3 дана узрокују инциденти клизања, спотицања и падова на равном. Несреће услед клизања током ходања чине више од 50% ових инцидената, чинећи их учесталим типом несреће у Европској унији (ЕУ). Према Немачком друштву за осигурање од несрећа (DGUV), трошкови повезани са несрећама услед клизања само у сектору трговине и индустрије износе око 2 милијарде евра годишње [2]. Према NFSI (National Floor Safety Institute) 50% падова и клизања у Европи је због неадекватне подлоге и 24% због обуће [3].

Ходање и трчање људи су свакодневне појаве у животу човека и реализују се уз услов постојања силе трења између обуће и подлоге. Ове појаве се одвијају у различитим условима и на различитим локацијама (суво, влажно, лед, подлога од плочица, бетона, различите врсте подова, разноврсне обуће). Услед различитих услова, коефицијент трења између обуће и пода се мења и његова вредност се креће од безбедних (високих) вредности (где је могућност пада мала) до ниских вредности када се могућност пада повећава, а самим тим и могућност повреде. Истраживања показују да је најчешћи узрок падова клизањем (79%) услед неодговарајућих материјала ђонова и подова [1]. Падови услед клизања су чести и на радним местима и дешавају се обично када је површина пода контаминирана водом, детерџентом, уљем, машћу итд. Из напред наведеног може се закључити да је испитивање трења између обуће и пода веома значајно како би се смањила могућност падова услед клизања, а самим тим и број повреда и насталих трошкова. Ови проблеми се све више обрађују од стране произвођача спортске опреме или произвођача заштитне опреме за посебне или специјалне радне услове.

Трибологија, наука која проучава интеракције између површина у контакту, која укључује трење, хабање и подмазивање игра кључну улогу у разумевању како различите површине утичу на безбедност и функционалност подова. Узимајући у обзир различите

услове и потребе корисника, развој триболошки оптимизованих решења може значајно допринети смањењу ризика од падова и повреда на јавним површинама.

Материјали који се најчешће користе за израду ђонова обуће су гума и њој слични материјали јер њихове карактеристике омогућају добра триболошка својства са једне стране и удобност (амортизацију) са друге.

Неки од тих материјала су:

- **Природна гума:** Природна гума је еластична и нуди одличну отпорност на клизање. Она се често користи за спортску и радну обућу.
- **Синтетичка гума:** Синтетичка гума, као што су стирен-бутадиен гума (SBR) и етилен-пропилен-диен мономер (EPDM), се често користи због своје трајности и отпорности на хабање.
- **Термопластични полиуретан (TPU):** TPU нуди добру отпорност на абразију и флексибилност, што га чини погодним за спортску и радну обућу.
- **Етилен-винил ацетат (EVA):** EVA је лаган, флексибилан и пружа добру амортизацију, што га чини популарним за обућу као што су патике и сандале.
- **Полиуретан** је чврст и издржљив материјал који нуди добру отпорност на абразију и хемијске агенсе. PU ђонови су лаки и пружају добру амортизацију, што их чини погодним за разне типове обуће, укључујући спортску и радну обућу.
- **PVC** је економичан материјал који се често користи за ђонове јефтине обуће. Он нуди добру отпорност на хабање и клизање, али није тако флексибилан као гума или полиуретан.
- **Кожа** је традиционални материјал за ђонове који не припада групи полимера али који пружа елегантан изглед и добру трајност. Ђонови од коже се често користе за формалну и класичну обућу. Они нуде добру пропустљивост ваздуха, али могу бити клизави на мокрим површинама.

Често се користе комбинације различитих материјала како би се постигли најбољи могући резултати у погледу трајности, флексибилности и удобности. На пример, ђон може имати средњи слој од EVA пене за амортизацију, а спољни слој од гуме за отпорност на хабање и клизање.

Виско-еластичност је једна од битнијих карактеристика гуме (чиме се она разликује од других материјала) и неких сличних материјала да када се оптерете и после растерете, део енергије апсорбују, тј. јављају се хистерезисни губици. Приликом транслаторног кретања гуме по тврдој храпавој површини, неравнине подлоге ће изазвати пулсирајуће деформације гуме, што доводи до вискоеластичне дисипације (расипања) енергије у

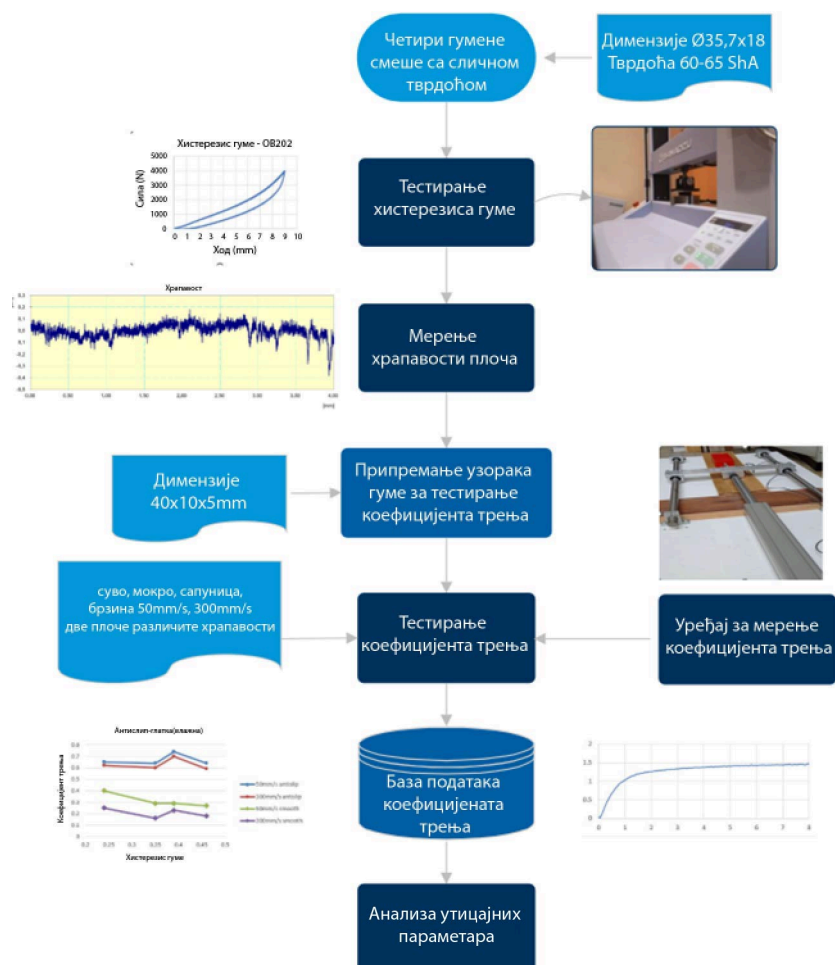
већем делу гуме. У досадашњим истраживањима већина аутора се бави утицајем тврдоће гуме на њене триболошке карактеристике, у великој мери занемарујући њена хистерезисна својства, иако је хистерезисна компонента део механизма трења виско-еластичних тела. Аутори [4] [5] [6] [7] који су проучавали утицај хистерезиса су се фокусирали на одређивање удела хистерезисне компоненте при различитим триболошким условима, без одређивања вредности самог хистерезиса као својства гуме и утицаја вредности хистерезиса на вредност коефицијента трења. Због напред наведеног, предмет научног истраживања у овој дисертацији је утицај вредности хистерезиса гуме на коефицијент трења између обуће и тврде подлоге у различитим триболошким условима. Један од мотива за спровођење оваквог истраживања је и могућност да би се резултати могли искористити у циљу смањена незгода при ходању.

1.2 Циљ истраживања

Гума је материјал са специфичним карактеристикама које јој омогућавају између осталог широку примену у апликацијама које захтевају генерисање што већег коефицијента трења. У неким спроведеним истраживањима [4] [7] [8] [9] као једна од главних карактеристика приликом истраживања трења код гуме је тврдоћа гуме, поред осталих физичко-механичких карактеристика. Циљ овог научног истраживања је одређивање утицаја хистерезиса гуме за израду ђонова обуће на коефицијент трења у контакту са подлогом. Циљ је показати да у одређеним условима контакта обуће и подлоге коефицијент трења зависи од хистерезиса гуме и да ако је познат хистерезис гуме, могуће је предвидети триболошка својства у напред наведеним условима помоћу статистичких математичких метода или применом савремених алата за предвиђање заснованих на вештачкој интелигенцији.

1.3 Методологија истраживачког рада

Методологија и поступак истраживачког рада приказани су на Слика 1.1.



Слика 1.1 Методологија истраживања и процедуре

У сврху остваривања циљева научног истраживања, примењене су следеће научне методе:

- Експериментално одређивање тврдоће гуме. У оквиру експеримента коришћене су различите смеше гуме, истих тврдоћа али различитог хистерезиса.

Измерена је тврдоћа гуме, а затим одређен хистерезис гуме различитих смеша.

- Експерименталне методе за одређивање статичког и кинетичког коефицијента трења при различитим триболошким условима. У оквиру експерименталног истраживања ће се одредити коефицијент трења гумених смеша на трибометру развијеном за потребе експерименталних истраживања

у оквиру докторске дисертације, при различитим триболошким условима. Поред различитих узорака гуме, приликом мерења силе трења коришћена је различита брзина клизања, гранитне плоче различите храпавости, различити услови контакта (суво, влажно и са сапуницом). Испитивања су спроведена на гранитним плочама велике тврдоће како би се елиминисао утицај тврдоће подлоге на вредност коефицијента трења у контакту обуће и пода.

- Мерење и снимање храпавости гранитних плоча (2D и 3D)- профилометрија и микроскопија.
- Анализа и синтеза експерименталних података. Резултати експерименталних истраживања обрађени су аналитичким као и нумеричким методама (Регресиона анализа и Тагучи метод) како би се утврдио утицај хистерезиса гуме на вредност коефицијента трења при различитим триболошким условима, као и одређивање утицајних параметара на коефицијент трења.
- На основу експерименталних резултата утврђен је и поступак за предвиђање вредности коефицијента трења у зависности од вредности хистерезиса гуме и осталих триболошких параметара применом неуронских мрежа. 

1.4 Структура рада

 Дисертација има укупно десет поглавља, која ће мало детаљније бити описана у наредним пасусима.

Прво поглавље је названо „Увод“ где су у првом делу описани проблеми (клизање и падови) који настају услед недовољног коефицијента трења између обуће и подлоге. Дати су подаци како клизање и падови утичу на економију и здравље људи. У другом делу увода су представљени циљеви истраживања као и методологија која ће се користити у дисертацији.

У другом поглављу „Механичке и триболошке карактеристике гуме“ су описане особине и карактеристике које утичу на триболошка својства исте. Описују се вискоеластична својства гуме, хистерезис, структура гуме. Поред особина гуме даје се кратак преглед теорија трења значајних за појаву трења између гумених делова и осталих материјала. У наставку поглавља укратко су описани и механизми генерисања трења код гуме и које све компоненте трења се јављају у контакту са чврстом подлогом. Описане су и методологије за испитивање коефицијента трења,

хистерезиса гуме као и методе за анализу добијених података мерењем (регресиона анализа, Тагучи метода).

Треће поглавље је „Преглед истраживања у области коефицијента трења између обуће и подлоге“ где су описани досадашњи резултати истраживања који се односе на одређивање коефицијента трења између обуће и пода, као и сличних случајева трења гуме и материјала (код аутомобилског пнеуматика, заптивача). У поглављу су описана и истраживања која се баве предвиђањем коефицијента трења помоћу неуронских мрежа и других математичких метода попут регресије, ANOVA анализе, и Тагучи метода.

У четвртом поглављу „Експериментална истраживања“ је описан експеримент одређивања хистерезиса гуме, карактеристике која је у овој дисертацији представљена као један од битних параметара који утичу на коефицијент трења. Како је на основу досадашњих истраживања и тврдоћа битан параметар који утиче на коефицијент трења, у овом поглављу је описан и метод одређивања тврдоће гуме као и одређивање храпавости плоча по којима се крећу гумени узорци.

Пето поглавље носи наслов „Експериментално одређивање коефицијента трења“ у ком је описано одређивање самог коефицијента трења између узорака гуме за израду ђонова и гранитних плоча.

У шестом и седмом поглављу су описани резултати анализе коефицијента трења помоћу математичких метода регресионе анализе и Тагучи метода. Поглавље разматра утицајност параметара на коефицијент трења између гуме и плоча као и њихову међусобну зависност.

Осмо поглавље се бави предвиђањем коефицијента трења помоћу неуронских мрежа на основу постојећих, прикупљених података из експеримената.

Девето поглавље носи назив „Закључак и даљи правци истраживања“. У овом поглављу наведени су најважнији резултати и закључци истраживања спроведених у оквиру докторске дисертације. Такође, у завршном делу поглавља наведени су могући правци даљег истраживања у области.

Десето поглавље је „Литература“ где су наведени сви аутори и радови који су цитирани у дисертацији.

Једанаесто поглавље чине „Прилози“. У оквиру овог поглавља дати су карактеристични дијаграми, слике као и изводи из коришћених софтвера.

2. Триболошке карактеристике гуме

2.1 Основне теорије о трењу

Узимајући у обзир двојаку природу трења, француски научник Кулон је предложио биномни израз за прорачун силе трења. На основу Кулонових поставки, у XX веку се развило неколико теорија трења које не могу да објасне механизам процеса трења у довољној мери, али доприносе бољем разумевању триболошких појава које се дешавају у зонама контакта елемената трибо-механичких система [10].

Најзаступљеније теорије трења су:

- Адхезиона теорија трења
- Молекулерно-механичка теорија трења
- Енергетска теорија трења

2.1.1 Адхезиона теорија трења

Када се оствари контакт два чврста тела под дејством оптерећења у случају еластично-пластичних материјала, остварује се равнотежа у равни ношења оптерећења:

$$A_r p_0 = F_N \quad 2.1$$

где су:

- A_r - укупна стварна површина додира,
- p_0 - гранична јачина материјала на притисак одређена тврдоћом мекшег материјала,
- F_N - сила којом су површине оптерећене.

Према Боудену и Тејбору, као последица пластичних деформација и блиског додира материјала на површинама стварног микроконтакта, атоми молекула једне и друге површине улазе у поље њихових привлачних сила. Да би се молекули раздвојили из равнотежног положаја и остварили релативно кретање површина, потребно је применити силу која ће одвојити спојена микроместа смицањем материјала у споју или ван њега. Јачина везе одређује да ли ће доћи до смицања по површини контакта (адхезивно одвајање) или на одређеној дубини испод површинског слоја

(кохезивно одвајање). Оба случаја су важна за трење и хабање. Сила потребна за овај процес зависи од величине стварне површине контакта и јачине материјала на месту смицања.

Та сила представља, према Боудену и Тејбору, основну компоненту силе трења:

$$F_T = A_r \tau = \frac{F_N \tau}{P_0} \quad 2.2$$

па је коефицијент трења:

$$\mu = \frac{\tau}{P_0} \quad 2.3$$

при чему се чврстоћа на смицање τ односи на мекши материјал у споју, укључујући и материјал са измењеном структуром у споју [11].

Аутори ове теорије, Боуден и Тејбор, додатно су развили своју теорију и формулисали модификовану адхезивну теорију трења. Овај пут су у разматрање укључили присуство различитих опни на додирним површинама и утицај тангенцијалне силе на контакт, што боље одговара реалним условима код фрикционих процеса. Таквим приступом су дошли до израза за коефицијент трења у облику [12] [13]:

$$\mu = C \frac{\tau_0}{P_0} = \frac{\tau_s}{P_0} \quad 2.4$$

где су:

- $C = \tau_s / \tau_0$ - константа која зависи од материјала,
- τ_s - критични напон на смицање основног материјала мање тврдоће,
- τ_0 - критични напон на смицање опни којима је тај материјал прекривен.

Ова теорија потврђује два основна закона о трењу: да сила трења не зависи од укупне номиналне површине контакта и да сила трења зависи само од стварне површине контакта, која је пропорционална притиску. Међутим, у неким случајевима ова теорија није примењива због великих одступања експерименталних налаза. На пример, код веома тврдих материјала као што је дијамант, или изразито еластичних материјала попут гуме, деформације при смицању слојева су еластичне, па стварна површина контакта није пропорционална притиску, а коефицијент трења клизања чак расте са опадањем

притиска. Такође, велика одступања се јављају и код метала у вакуму, где непосредни контакт метала није спречен оксидним слојевима [11].

2.1.2 Молекуларно-механичка теорија трења

Када два тела ступе у контакт, неравнине тврђег тела упадају у површину мекшег. При клизању, површински слој мекшег тела се интензивно деформише због смицања неравнина. Сила која се супротставља овом деформисању назива се деформациона компонента силе трења (F_{Td}). Поред тога, постоји и сила која спречава клизање, условљена међумолекуларним дејством у зони додира, која се назива молекуларна компонента силе трења (F_{Tm}). Укупна сила трења која се јавља у зони контакта трибо-механичких система представља збир молекуларне и деформационе компоненте:

$$F_T = F_{Tm} + F_{Td} \quad 2.5$$

Контакт између два чврста тела одвија се на одређеном броју тачака, где врхови површинских неравнина долазе у контакт. На местима додира формирају се фрикционе везе као резултат међумолекуларних сила. При кретању једног елемента по другом, врхови неравнина чвршћег елемента пролазе кроз површински слој мекшег елемента, што доводи до накупљања материјала испред врхова неравнина и стварања жљебова и зареза на контактної површини. Истовремено се одвија процес формирања и раскидања фрикционих веза који траје током кретања. Раскидање ових веза може се десити на местима додира или у дубини контактнoг слоја, у зависности од чврстоће фрикционе везе у поређењу са чврстоћом мекшег материјала. Због овога, трење доводи до промене микро-геометрије обе контактне површине. Након одређеног времена контакта, неравнине на површинама могу се променити у величини у односу на почетни облик [11].

Молекуларно-механичка теорија трења уводи појам "трећег тела", које је важно за триболошке процесе у контакту елемената трибо-механичког система. Ово "треће тело" укључује спољашње граничне слојеве (попут адсорбованих гасова, воде, уља, или хемијских производа као што су оксиди) и унутрашње граничне слојеве (деформисан материјал настао у процесу обраде металне површине).

Метод прорачуна молекуларне компоненте силе трења до данас није довољно тачно разрађен. Ипак је извесно да је:

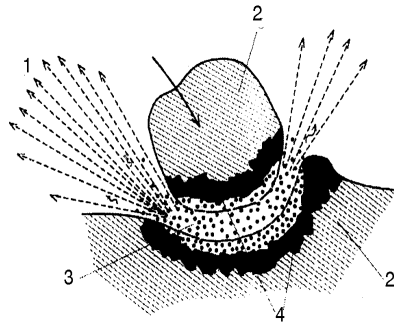
$$F_{Tm} = \tau_n A_r \quad 2.6$$

где су:

- τ_n - средњи тангенцијални напон који постоји у зони контакта и условљен је међумолекуларним узајамним дејством,
- A_r - реална површина контакта.

2.1.3 Енергетска теорија трења

Енергетска теорија трења се заснива на тзв. магма-плазменом моделу контакта (Слика 2.1). Овај модел описује како се у веома кратким временским интервалима на пегам додира ослобађа велика количина енергије, што доводи до узајамног деловања чврстих тела са импулсним карактером. Ради објашњења физичке суштине процеса трења, у анализи се полази од тога да се на пегам додира у врло кратком временском интервалу, у трајању од око $10^{-10} - 10^{-7}$ секунде, ослобађа сразмерно огромна количина енергије.



Слика 2.1 Магма-плазмени модел трења Тисена:

1 – трибоемисија; 2 – нормална структура материје; 3 – плазма; 4 – формирање и кретање дислокација

Према овој теорији, у процесу трења могуће је да поједини структурни елементи добију толико енергије да валентни електрони напусте своје орбите, што доводи до стварања јона и трансформације материје у четврто агрегатно стање — плазму. То значи да на пегам додира током трења могу постојати сва четири агрегатна стања: чврсто, течно, гасовито и плазмено.

Коефицијент трења према енергетској хипотези може да се прикаже у облику:

$$\mu = \frac{e_{tr}}{p_r} i_t \quad 2.7$$

где су e_{tr} – резултујућа густина енергије, p_r – реални притисак, док је i_t – интензитет трења који зависи од тога да ли је у питању еластични или пластични контакт фрикционих површина.

ФлајшEROVA енергетска теорија трења нуди изразе за прорачун силе трења, коефицијента трења и интензитета хабања у различитим случајевима трења, који се добро поклапају са експерименталним подацима. Међутим, ова хипотеза још увек није у потпуности потврђена теоријски и експериментално [11].

2.2 Гума и њене триболошке карактеристике

2.2.1 Структура гуме

Гума је материјал од изузетног значаја у савременом свету. Њена употреба је свеобухватна, покривајући разне индустрије, од аутомобилске до медицине. Једна од најважнијих карактеристика гуме је њена еластичност. Еластичност омогућава гуми да се врати у првобитни облик након деформације, што је чини идеалном за различите примене, као што су гуме за возила, ђонове обуће и разне врсте заптивача. Још једно битно својство гуме које је од кључног значаја у многим применама је нестишљивост. Нестишљивост, у контексту материјала, односи се на својство материјала да се не смањује запремина под утицајем притиска. Овај феномен је важан за материјале који се користе у применама где је потребно одржати облик и запремину под различитим оптерећењима. За многе материјале, као што су метали и керамика, запремина се може смањити када су изложени великим притисцима. Међутим, гума показује значајну отпорност на ову врсту деформације. Ово својство проистиче из структуре саме гуме, која се састоји од дугих полимерних ланаца који су међусобно повезани. Гума је материјал који се састоји од различитих компоненти које јој дају изузетна механичка, хемијска и физичка својства. Главни састојци гуме су полимери, пунила, вулканизациони агенси и разни адитиви. Ове компоненте се комбинују да би се добио материјал који је издржљив, еластичан и отпоран на различите утицаје. Полимери су основни састојци гуме. Они су дугачки ланци молекула који су међусобно повезани и који гуми дају њену

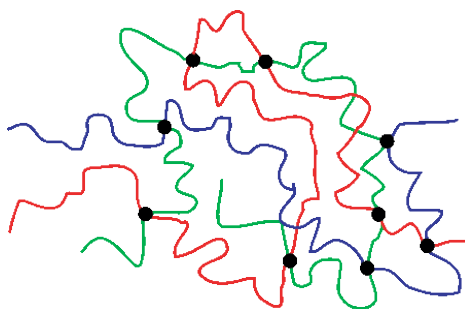
еластичност и флексибилност. Постоје два главна типа полимера који се користе у производњи гуме: природни и синтетички полимери.

- Природна гума: Добија се из латекса дрвета *Hevea brasiliensis*. Природна гума има одличну еластичност и отпорност на абразију (хабање).
- Синтетичка гума: Производи се од нафтних деривата кроз различите хемијске процесе. Најчешћи типови синтетичке гуме укључују стирен-бутадиен каучук (SBR), полиизопрен и полиуретанску гуму. Синтетичка гума се користи због своје прилагодљивости и могућности модификације својстава.

Пунила (филери) играју значајну улогу у модификацији хистерезисних својстава гуме. Најчешћи пуниоци који се користе у ту сврху су:

- Чађ је један од најчешће коришћених пуниоца у гумарској индустрији. Утиче на повећање механичке чврстоће, отпорности на абразију и хистерезис гуме. Гуме са високим садржајем чађи имају већи хистерезис, што доводи до већег загревања током употребе. Међутим, чађ истовремено побољшава отпорност гуме на хабање, што је важно за примене где је потребна дуготрајност.
- Силицијум диоксид (силика) је још један важан пунилац који се користи у производњи гуме. Он се често користи у комбинацији са чађи или као замена за чађ у неким применама. Силицијум диоксид смањује хистерезис у поређењу са чађи, што доводи до нижег загревања гуме током употребе. Ово својство је посебно корисно у производњи гума са ниским отпором котрљања, које се користе за побољшање ефикасности возила (мање потрошње горива).
- Полимерни пуниоци, као што су термопластични еластомери и различити кополимери, могу се користити за модификацију хистерезисних својстава гуме. Ови материјали могу побољшати еластичност и смањити унутрашње трење у гуменим производима, што резултира нижим хистерезисом.
- Смоле и пластификатори се додају у гумене смеше да би се побољшала флексибилност и обрада. Међутим, они такође могу утицати на хистерезис. На пример, додавање одређених смола може повећати хистерезис, док неки пластификатори могу смањити унутрашње трење и, самим тим, хистерезис.
- Различити органски и неоргански пуниоци, као што су: калцијум карбонат, глина и талк, могу такође утицати на хистерезис гуме. Ови материјали могу променити механичка својства гуме и њено понашање при циклусима оптерећења, што утиче на количину енергије која се губи као топлота.

Гума се састоји од полимерних ланаца који су повезани у мрежасту структуру. Ова структура омогућава материјалу да се развуче и врати у првобитни облик након деформације, али је такође одговорна за његову отпорност на компресију. Када се гума изложи притиску, полимерни ланци се распоређују и међусобно реагују на начин који спречава значајно смањење запремине [14]. И природна и синтетичка гума се састоје од дугих молекуларних ланаца угљеника и водоника. Ланац може садржати хиљаде јединица угљеник-водоник. У комаду гуме у њеном нормалном стању ланци нису поређани у уредном паралелном низу. Напротив, они су намотани и запетљани на начин приказан шематски на Слика 2.2 [15].



Слика 2.2 Полимерни ланци гуме [5]

У ствари, просечно растојање између крајева ланца може бити само десетина или хиљадити део растегнуте дужине ланца. То је као да се гума састоји од запетљаних намотаних опруга. Ако покушамо да развучемо комад гуме, вучемо намотане ланце и одмотавамо их. Јасно је да гума може бити подвргнута огромном развлачењу (десет до двадесет пута од своје првобитне дужине) пре него што се ланци потпуно исправе. У овом стању гума показује одређене кристалне особине јер су ланци паралелни и блиско спаковани [15].

Појам „гума“ често се користи уопштено, обично се односи на материјал који је компаундиран и вулканизован. У сировом стању, овај материјал се назива еластомер. Вулканизација формира хемијске везе између суседних ланаца еластомера и на тај начин пружа димензионалну стабилност, чврстоћу и отпорност [16].

Из разлога који су добро разумљиви, али које не можемо једноставно објаснити, отпорност на деформацију зависи од дужине сегмената између сваке везе, а не од дужине молекула. Што је сегмент краћи, отпорност на деформацију је већа. Стога, можемо променити еластична својства гуме варирањем броја веза. Што више веза убацимо, гума постаје тврђа или крућа. У крајњем случају можемо увести толико много веза да материјал престаје да буде гумен и постаје тврд, као вулканит или ебонит.

Детаљно понашање гуме зависи од броја унакрсних веза и структуре молекуларних ланаца. Такође, значајно зависи од температуре. Како се температура смањује, намотане молекуларне опруге постају све круће. На веома ниским температурама гума постаје тврда и крута, па чак и крта. Ово представља проблем за аутомобилске гуме које раде у арктичким условима. У неким гумама ланци се не запетљавају са суседним и лако клизе једни преко других, тако да када се сегменти одмотају током деформације и затим поново намотају када се деформациона сила уклони, веома мало енергије се губи. Тада се каже да је гума веома еластична (отпорна). На пример, ако се лопта од такве гуме баци на тврду подлогу, одскочиће готово до своје првобитне висине. Због тога се еластична гума понекад назива „скакутава“ или „живахна“ [15].

Супротно томе, неке гуме имају молекуларну структуру са незграпним бочним групама које су повезане са главним ланцем. Током намотавања и одмотавања сегмената, енергија се троши на повлачење ових незграпних група једних преко других. У овом процесу може се изгубити значајна количина енергије и каже се да гума има ниску отпорност: неће добро одскакати и због тога се понекад назива „мртва или натопљена“ гума. Већина технолошких гума, на пример оних које се користе у аутомобилским гумама, садрже значајну количину пуниоца (филера) у облику врло финих честица угљеника. Ово повећава тврдоћу гуме и њену отпорност на хабање. Такође се користи за повећање својстава губитка хистерезиса у гуми. Пошто су честице угљеника јефтиније од саме гуме, гума са филерима је (или треба да буде) значајно јефтинија од гуме без филера исте тежине [15].

2.2.2 Вискоеластични модели материјала

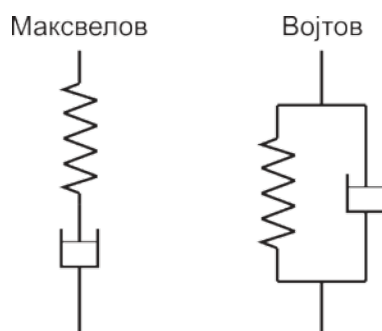
Идеално еластично чврсто тело се понаша у складу са Хуковим законом, док се идеални вискозни флуид понаша у складу са Њутновим законом, где је напон пропорционалан промени релативне деформације током времена [17] [18]. Метали и керамике на високим температурама, као и полимери уопште, припадају групи материјала који се налазе између ових екстрема и дефинишу се као вискоеластични материјали. На основу дефиниције идеалног вискозног флуида, Њутнов закон се може написати у облику:

$$F = c \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad 2.8$$

где је c – коефицијент вискозног трења. Њутнов закон се може изразити и у облику:

$$\sigma = \mu_e \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad 2.9$$

где су σ – напон истезања, ε – релативна деформација при истезању и μ_e – Њутнов коефицијент вискозности при истезању.



Слика 2.3 Шематски приказ Максвеловог и Војтовог модела вискоеластичности [19]

Максвелов и Војтов модел (Слика 2.3) представљају два основна вискоеластична модела. Максвелов модел се састоји од еластичне опруге и вискозне пригушнице повезаних у серији, док је код Војтовог модела ова веза паралелна. Међутим, механичко понашање реалних материјала често не може бити описано овим основним моделима, па се уводе уопштени Максвелов и уопштени Војтов модел. У Табела 2.1 приказане су једначине и изрази којим су дефинисана два вискоеластична модела, Максвелов и Војтов модел.

Табела 2.1 Понашање вискоеластичних елемената [17] [18]

	Максвелов модел	Војтов модел
Једначина кретања	$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{k} \left(\frac{dF}{dt} \right) + \frac{F}{c}$	$F = kx + c \left(\frac{dx}{dt} \right)$
Основни закон	$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) + \frac{\sigma}{\mu_e}$	$\sigma = E\varepsilon + \mu_e \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)$
Услов	једнакости силе	једнакости деформације
Услов	сабирања деформација	сабирања сила
$\tau = c / k$	време релаксације	време ретардације
Релаксација напона $dx / dt = 0$ или $x = const$	$F = F_0 e^{-t/\tau}$	$F = kx$
Пузање $dF / dt = 0$ или $F = const$	$x = x_0 + \frac{Ft}{c}$	$x = \frac{F_0}{k} (1 - e^{-t/\tau})$
Константна брзина деформације $dx / dt = const$	$F = c \frac{dx}{dt} (1 - e^{-t/\tau})$	$F = \frac{dx}{dt} (c + kt)$
где су: k – крутост опруге c – коефицијент вискозног трења (коефицијент пригушења) x_0 – померање у тренутку $t = 0$ F_0 – сила у тренутку $t = 0$		

Уопштени Максвелов модел карактерише расподела модула еластичности као функција времена релаксације, док уопштени Војтов модел карактерише расподела сагласности као функција времена ретардације. Ови модели спадају у групу линеарних вискоеластичних модела јер важи Болцманов принцип суперпозиције, што значи да је деформација последица суме појединачних напона.

Динамичка испитивања и пузање се чешће представљају Војтовим моделом, док се релаксација напона представља Максвеловим моделом. Решавањем Војтовог модела може се добити напон елемента кроз реални и имагинарни део комплексног динамичког модула, који дефинише фактор хистерезисног пригушења.

$$\sigma = (E_1 + iE_2) \varepsilon = E^* \varepsilon \quad 2.10$$

где су:

E_1 – реални део комплексног динамичког модула (модул еластичности)

$E_2 = \omega \eta_e$ — имагинарни део комплексног динамичког модула (модул еластичности губитка)

E^* — комплексни динамички модул

Однос имагинарног и реалног дела комплексног динамичког модула дефинише фактор хистерезисног пригушења:

$$\eta = \tan \delta = \frac{E_2}{E_1} \quad 2.11$$

где је δ угао фазног помераја напона у односу на релативну деформацију.

Динамичке особине полимера се најчешће карактеришу помоћу динамичког механичког анализатора (DMA), који одређује параметре динамичког понашања у зависности од фреквенције и температуре. Због линеарности и компликованих математичких формулација, развијени су специјализовани вискоеластични модели материјала који прецизније описују њихово механичко понашање.

Вискоеластичност гуме подразумева њено комбиновано еластично и вискозно понашање, где материјал складишти и дисипира (расипа) енергију под оптерећењем. Управо због вискоеластичности долази до хистерезиса, односно појаве заостајања деформације за примењеном силом.

2.2.3 Хистерезис гуме

Хистерезис је термин грчког порекла који изразом означава да се у оптерећењу и затим растерећењу специфичног узорка он никад не враћа у почетни положај. У току процеса се изгубио део енергије. Дакле, гума високе отпорности има мале губитке хистерезиса. Ови губици енергије се појављују као топлота у гуми [15].

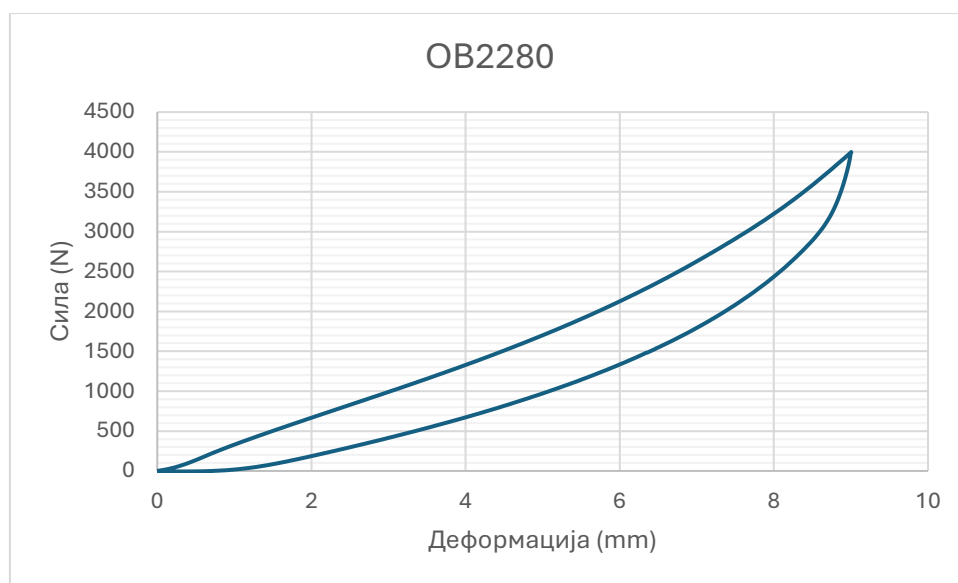
Хистерезис у гуми такође утиче на амортизацију. Постоји разлика у амортизационим својствима гуме и амортизационих елемената направљених од других материјала (на пример, челичне опруге, ваздушни јастуци...).

Еластична деформација гуме је повезана са њеном специфичном молекуларном структуром. Еластомери се састоје од молекуларних ланаца каучука који су повезани преко попречних веза са атомима средства за вулканизацију, чиме се формира неуређена тродимензионална структура. Код гума које садрже пуниоце, формирају се и слабе попречне везе са атомима или молекулима пуниоца. При истезању, молекуларни ланци се исправљају у правцу дејства спољашње силе, што доводи до напрезања у суседним ланцима због попречних веза. Када престане дејство спољашње силе, молекули гуме се

враћају у свој првобитни положај, јер у недеформисаном стању имају највећу ентропију [15].

Када се молекуларни ланци гуме исправљају под утицајем спољашњег оптерећења, суседни ланци клизају један по другом због умрежене структуре гуме. Током клизања, сила трења између ланаца се јавља и спречава њихово релативно кретање. Део енергије која се примењује споља се троши на превазилажење овог отпора трењу. Ова особина је коришћена у инжењерству за пригушивање буке и вибрација. Такође, унутрашње трење доводи до тога да је механичко понашање гуме у суштини вискоеластично, односно може постати вископластично ако дође до превелике деформације која изазове трајно оштећење молекуларних ланаца [15].

Због вискоеластичног понашања гуме, све гуме при оптерећењу и растерећењу показују криву напон-релативна деформација у облику хистерезисне петље. Ова петља на графику (Слика 2.4) представља енергију која се троши због унутрашњег трења у гуми, односно енергију која се апсорбује.



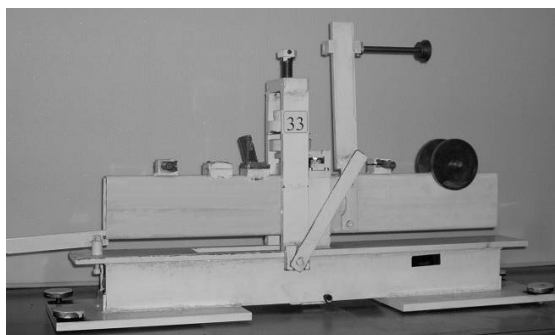
Слика 2.4 Хистерезисна петља узорка гуме OB2280

У случају природне гуме која не садржи пуниоце, хистерезис је веома мали при умереном истезању. Међутим, са порастом деформације, хистерезис расте, што значи да се више енергије губи због унутрашњег трења. Овај ефекат је повезан са кристализацијом молекуларних ланаца, која се јавља када се молекуларни ланци поређају паралелно при великом истезању, што доводи до појачаних међумолекуларних сила привлачења. Поред тога, повећање садржаја пуниоца у гуми такође доводи до повећања хистерезиса. То је резултат већег унутрашњег трења које пуниоци узрокују [20].

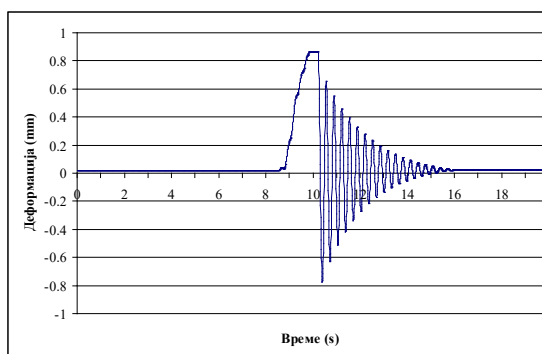
Хистерезисна петља на Слика 2.4 представља енергију која се губи током циклуса оптерећења и растерећења и израчунава се као површина затворена унутар хистерезисне петље на графику сила-деформација. Ово се може урадити нумерички интеграцијом података.

Рад је, по дефиницији, интеграл силе и померања (површина испод графикона сила/померање). Разлика у интегралима за ширење и скупљање (површина петље на графикону) представља топлоту у џулима генерисану по циклусу у материјалу. Најчешћи примери оваквог понашања укључују гуму и сличне полимере. На пример, гуме се загревају када се возе на путу. Топлота се не генерише трењем, већ је последица хистерезиса у гуми док се савија (тренутно се поравнава са путем). Отпор услед ове конверзије кинетичке енергије у топлоту описује се као отпор котрљања [21].

На Слика 2.5 је приказан уређај за одређивање Јерзлијевог хистерезиса, док је на Слика 2.6 приказан карактеристичан дијаграм осциловања код Јерзлијевог хистерезиса.



Слика 2.5 Осцилограф



Слика 2.6 Јерзлијев хистерезис

За испитивање Јерзлијевог хистерезиса се користе епрувете облика ваљка следећих димензија:

Пречник: $19,5 \pm 0,13 \text{ mm}$,

Висина: $12,5 \pm 0,25 \text{ mm}$.

Епрувете могу бити израђене пресовањем у калупу или резањем, али се препоручује први начин због веће хомогености и тачнијих димензија. Епрувете не смеју имати огреботине, зарезе, поре или друга оштећења. Уређај и епрувете треба држати довољно дуго на температури испитивања како би се постигла термичка равномерност. Ако се испитивање спроводи на температурама нижим од собне, неопходно је охладити и онај део уређаја који долази у контакт са епруветом. Охлађени део уређаја треба да има полицу за смештај епрувета и да омогући циркулацију расхладног флуида. Уколико није другачије прописано, хладна комора и услови испитивања треба да буду у складу са стандардом ASTM Practice D 832 [22]. Када епрувета достигне температуру испитивања, примењује се даљи поступак описан у наставку. За испитивање на повишеним температурама треба применити сличне услове. Одређивање Јерзлијевог хистерезиса се врши након постављања епрувете у почетни положај (преко брусног папира). Утврди се број и маса тегова који ће изазвати статичку деформацију од 20 %. Ослободи се полуга и пусти да осцилује све до потпуног смиривања. При томе морају настати најмање три пуне осцилације. Снима се померање неке тачке на полузи или притисној плочи.

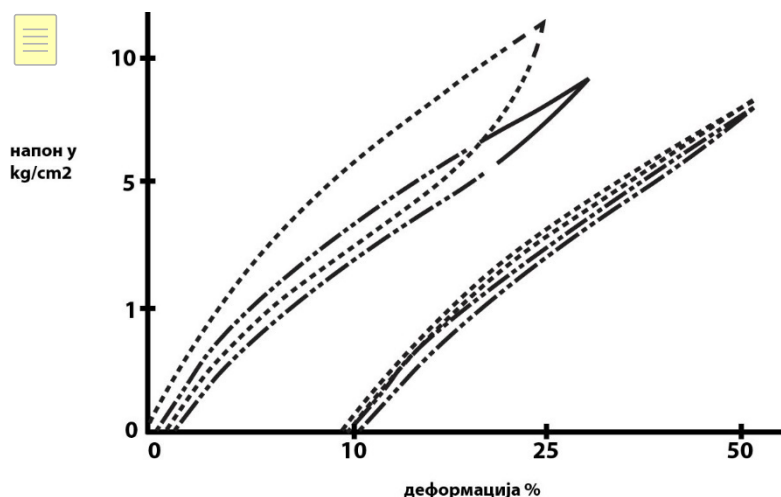
Јерзлијев хистерезис представља део ударне енергије који се апсорбује у материјалу епрувете услед унутрашњег трења. Израчунава се по формули:

$$H_u = 100 - E_u(\%) \quad 2.12$$

где је E_u степен еластичности.

Гуме које садрже само процесне додатке и хемикалије за заштиту, бојење и иницирање вулканизације познате су као „непуњене гуме“ (без филера). Већина гуме која се користи у индустријској пракси садржи пунила (филере), углавном један од многих типова чађи, која може чинити до једне трећине укупне запремине смеше. Ова пунила од чађи могу се поделити у две групе: (1) "армирајуће" чађи које побољшавају карактеристике отпорности на хабање и абразију непуњене гуме, као што су повећање Јунговог модула еластичности, хистерезиса и пузања; и (2) "неармирајуће" чађи које имају мањи утицај на хабање и абразију, али пружају само умерено повећање модула, хистерезиса и пузања. Међутим, могу се додавати у већим количинама у поређењу са армирајућим пунилама од чађи.

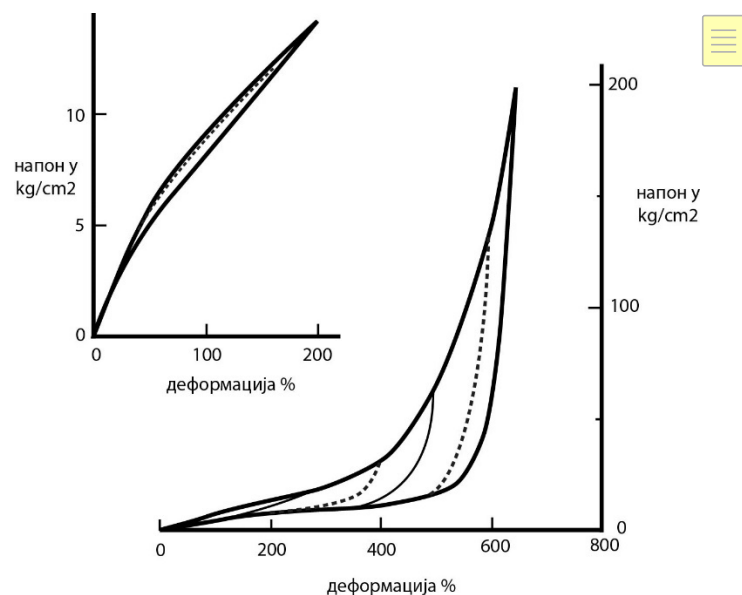
Хистерезис, тј. површина између кривих оптерећења и растерећења (хистерезисна петља) у циклусу оптерећење-деформација, јавља се у свим гуменим материјалима (Слика 2.7). Код природне гуме, која не садржи пунила, хистерезис је веома мали код умереног истезања (погледати додатак на Слика 2.7); пунила повећавају хистерезис. Код великих деформација, које нису уобичајене у практичним применама, хистерезис је много већи (Слика 2.7). Ово је повезано са кристализацијом која се јавља током истезања и разлог је за велику чврстоћу природне гуме [23].



Слика 2.7 Хистерезисна петља после 10 циклуса (пуна линија) код гуме која садржи 50 делова појачаване са чађи (лево) и 50 делова непојачаване са чађи (десно) [23]

Изломљена линија представља први циклус сваког испитивања. Напон и деформација су сачуванати према димензијама на почетку првог циклуса. Измештени старт петље коначног циклуса у односу на оригинални је условљен трајном деформацијом [23].

Брзе и поновљене деформације могу изазвати значајну хистерезисну енергију која се мора распршити као топлота. Повећање температуре може довести до термичке деградације. Природна гума, са својим ниским хистерезисом, има предност као материјал за примене које укључују вибрације, где хистерезис пружа мали, али пожељан ефекат амортизације без ризика од значајног повећања температуре. Хистерезис је мера губитка енергије, док је еластичност мера повраћене енергије. Обе зависе не само од типа полимера, већ и од пунила и других адитива [23].



Слика 2.8 Хистерезисна петља првог циклуса за природну гуму која се истезе до различитих деформација

Код мањих деформација (горе лево) постоји мали хистерезис, али је много већи код већих деформација што је изазвано кристализацијом [23].

Модул природне гуме у динамичким условима значајно зависи од фреквенције испод 1000 циклуса у секунди и температуре околине (0-50°C). На пример, повећање крутости од 100 до 300 с.р.м. у поређењу са статичким условима је приближно 5-15% у смицању и 8-25% у компресији за гуму до 60 IRHD (International Rubber Hardness Degree). Међутим, при 70 IRHD, повећање је око 35% у смицању и 60-90% у компресији [23].

На модул такође може да утиче структурно пуцање. Током иницијалног оптерећења гуме са пунилима од чађи, неке структуре чађи пуцају, узрокујући да гума постане мекша током наредних оптерећења. Скоро сва пуцања се јављају током првих неколико циклуса оптерећења, што је најизраженије код гуме која садржи армирајућа пунила (Слика 2.8). Број пуцања се повећава са повећањем деформације. Уобичајена пракса је да се гумени индустријски производи пре тестирања више пута претходно оптерете до максималног оптерећења, чак и за статичка тестирања.

Хистерезис гуме је веома значајно својство гуме које утиче на трење и апсорпцију у ђону ципела. Постоји статички хистерезис (мерена и објашњена у овом раду) и динамички (Јерзлијев хистерезис). Статички хистерезис у овом експерименту се мери према интерној процедури Машинског факултета у Нишу. Ова процедура се спроводи већ 20 година и обухвата велики број тестирања различитих типова гуме (различите

тврдоће, мешавине) [18]. Статички хистерезис гуме мерен овом методом даје веома сличне резултате као и тестирање по Јерзлијевој методи јер нема значајних одступања у резултатима. Статички хистерезис гуме је једноставнија метода у поређењу са другима (Јерзлијева метода), не захтева специјалну опрему и изводи се на униаксијалној тест машини.

2.2.4 Механизми трења вискоеластичних тела по чврстој подлози

Трење вискоеластичних материјала који клизају на тврдој подлози је од великог значаја за многе практичне примене. У већини техничких система је пожељно да трење буде што мање како би се побољшала ефикасност, као што је случај са гуменим заптивкама, метлицама брисача или шприцевима. Ипак, постоје и системи где је потребно да трење буде што веће, као што је случај са аутомобилским гумама при убрзању, кочењу или скретању. Да би се успешно управљало трењем, важно је разумети физичке принципе овог процеса. Многи научници су проучавали феномен трења вискоеластичних материјала на чврстој подлози из теоријског и експерименталног аспекта [17] [18] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [2] [30].

Разлике у трењу између метала и гуме настају због различитих механизма који стварају силу трења.

Гуме или еластомери су састављени од дугих линеарних молекула који су увијени и заплетени заједно, формирајући аморфну чврсту супстанцу. Када је материјал под напрезањем, молекули се померају и поравнавају у смеру напрезања. Вискоеластичност настаје због релативног померања између молекула полимера и механизма напрезања, што резултира ниским модулом истезања уз задржавање релативно високе затезне чврстоће. Због ових механичких својстава, механика контакта код гуме значајно се разликује од механизма код већине других материјала.

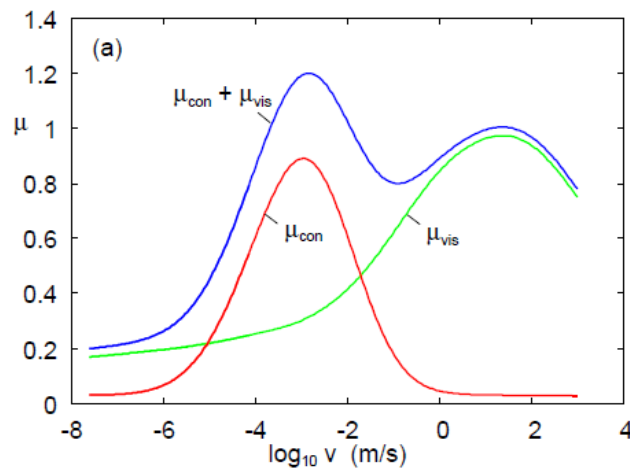
Вискоеластична тела, као што је гума, генеришу трење на три главна начина: адхезијом, деформацијом и хабањем.

С обзиром на ова три механизма генерисања силе трења, општа једначина трења гуме се може исказати као:

$$F_{uk} = F_{ad} + F_{def} + F_{hab} \quad 2.13$$

На основу истраживања, Smith [24] је развио теорију у којој је компоненту трења услед деформације гуме поделио на две компоненте: трење које потиче од хистерезиса

површинске деформације (микрохистерезис) и трење које потиче од хистерезиса запреминске деформације (макрохистерезис).

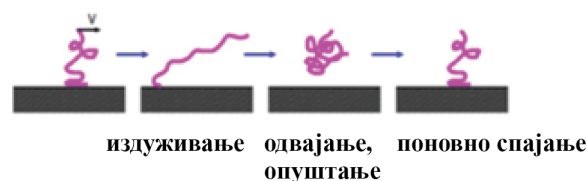


Слика 2.9 Утицај вискоеластичних деформација и реалне величине контакта на коефицијент трења у зависности од брзине клизања [31]

На Слика 2.9 приказује се утицај вискоеластичних деформација (хистерезисна компонента- μ_{vis}) и реалне површине контакта (μ_{con} -компонента адхезије) на величину коефицијента трења приликом клизања гуме на храпавој тврдој подлози.

2.2.4.1 Адхезија

Појава адхезије омогућава да се гума "лепи" за друге материјале, односно да приања. Адхезија је резултат молекуларне везе (привлачења) између две површине. Ако је јачина везе иста у свим контактним тачкама, сила која се противи клизању је пропорционална збиру сила на свим ситним површинама у контакту. Уколико су површине идеално глатке, стварна површина контакта би била једнака номиналној површини контакта, међутим, то није случај. Реална површина је веома храпава на молекуларном нивоу и контакт се дешава само на највећим избочинама (неравнинама) сваке од површина у контакту. Стварна површина контакта зависи од профила површина, својстава материјала и притиска контакта. Већа површина контакта значи већу адхезију између површина и већу силу трења.

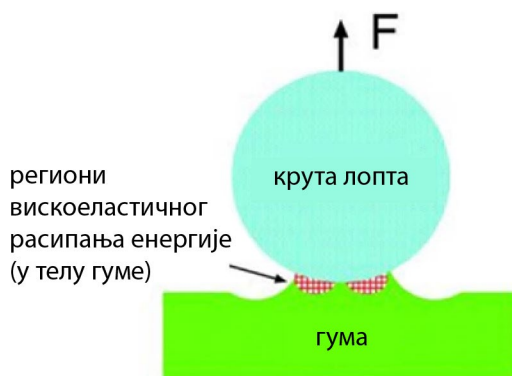


Слика 2.10 Механизам адхезионог трења

У подручјима где је гума у контакту са материјалом подлоге, полимерни ланци се везују за атоме подлоге услед привлачних Ван дер Валсових сила (Слика 2.10). Када се гума релативно креће у односу на подлогу, ови ланци се издужују све док напрезање не постане превелико и ланац се кида или одваја од подлоге. Издужени ланци гуме се затим преуређују у стање у којем се њихова енергија своди на минимум. Еластична енергија која је била акумулирана у ланцима се расипа, што изазива силу смицања пропорционалну реалној површини контакта. Овај механизам је значајан за клизање гуме на чистим и релативно глатким површинама, као што је стакло.

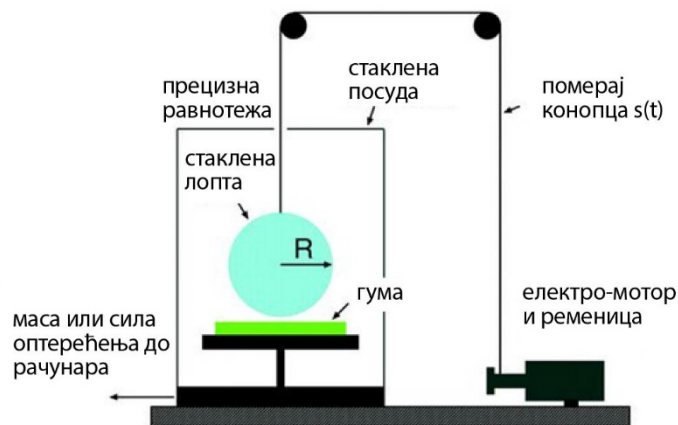
За грубе површине, адхезивни допринос трењу гуме је много мањи због мале површине контакта. Стварна површина контакта између пнеуматика и површине пута, на пример, обично је само око 1% од номиналне површине контакта. У овим условима верује се да преовладава хистерезисни механизам трења, односно трење услед деформације гуме.

Слика 2.11 приказује круту куглу која се одваја од вискоеластичног чврстог тела. Део енергије потребне за уклањање кугле потиче од дисипације вискоеластичне енергије унутар гуме у близини врха пуцања отвора (црвена испрекидана зона) [32].



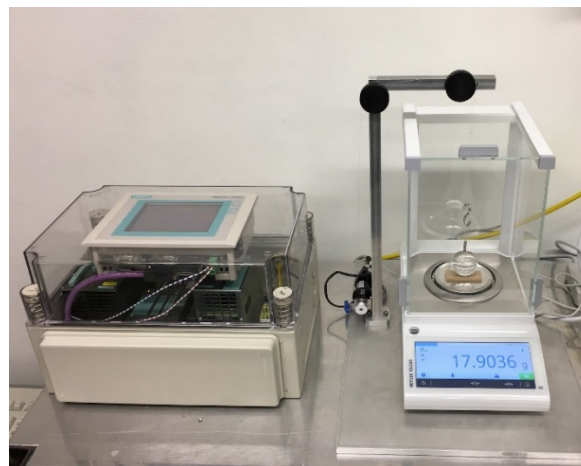
Слика 2.11 Дисипација вискоеластичне енергије између стаклене кугле и гуме [32]

У овом подешавању, на пример, стаклена кугла (са пречником $2R \approx 4 \text{ cm}$) може се довести у контакт са меком подлогом, као што је приказано на Слика 2.12. Она је постављена на веома прецизну аналитичку вагу која има поновљивост до $0,1 \text{ mg}$, што значи $\approx 1 \text{ } \mu\text{N}$ (подесиво). Након нуловања ваге, може се мерити сила на подлози као функција времена, а подаци се директно преносе на рачунар брзином до 10 тачака у секунди (подесиво, зависи од опције ваге) [32].



Слика 2.12 Шема уређаја за мерење адхезије између гуме и стаклене кугле [32]

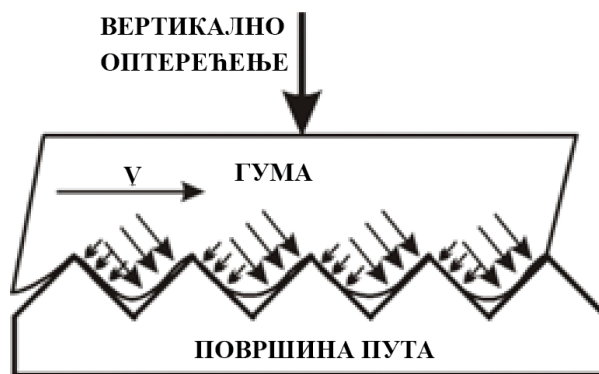
За подизање и спуштање стаклене кугле користи се електромотор који намотава најлонски конопач, причвршћен за куглу. Крута кугла се са понављањем помера горе-доле одређеном брзином. На Слика 2.13 приказан је уређај за тестирање адхезије [32].



Слика 2.13 Уређај за тестирање адхезије [32]

2.2.4.2 Деформација гуме и вискоеластичност

Када гума дође у контакт са храпавом површином крутог тела, до изражаја долази механизам генерисања трења услед деформације. Кретање гуме по храпавој површини изазива деформације гуме због истурених тачака површине, односно неравнина. Оптерећење гуме проузрокује да неравнине продиру у гуму и да гума обавија неравнине (Слика 2.14). Енергија потребна да неравнине продиру у гуму долази услед разлике у притиску између неравнина, као и због разлике притисака испред и иза неравнине [33].



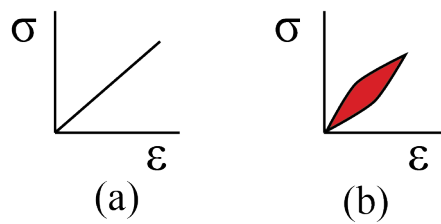
Слика 2.14 Распоред притиска на неравнинама пута

Сила трења која потиче од деформације представља највећи део трења који се јавља између гуме и влажне површине, јер влажна површина спречава директан контакт гуме и подлоге, чиме се онемогућава настанак адхезионе силе.

У овом случају, још једна специфична особина гуме – вискоеластичност, има значајну улогу. Гума је еластична и прилагођава се неправилностима површине, али је истовремено и вискоеластична, што значи да се не враћа потпуно у првобитно стање након деформације. Вискоеластичност је карактеристика гуме и неких сличних материјала да, када се оптерете и након тога растерете, део енергије апсорбују, што доводи до хистерезисних губитака (Слика 2.15).

Ако се прстом притисне гума аутомобила, она се брзо враћа у почетно стање, али ако се то уради на тркачком аутомобилу, гума се враћа много спорије. Ово је једноставан тест хистерезиса гуме. Гума са малим хистерезисом (губитком, односно расипањем енергије) брзо се враћа у првобитни положај, док се гума са великим хистерезисом полако враћа у почетно стање након деформације [33].

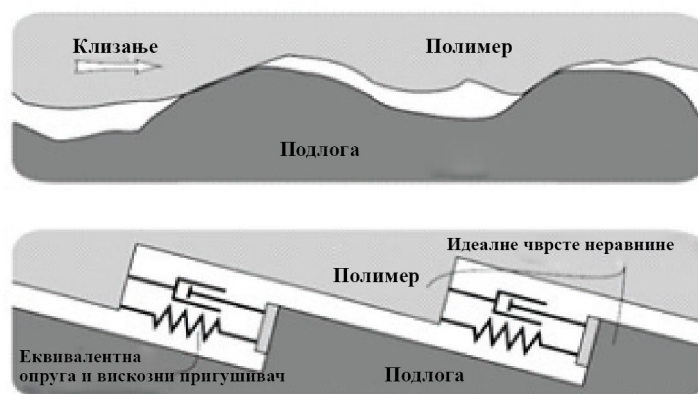
Утицај хистерезиса гуме може се видети на Слика 2.14 на примеру клизања гуме по храпавој површини. Ако се гума полако опоравља од деформација услед проласка преко неравнина, као што је случај са гумом са великим хистерезисом, она не може да притисне силазне површине неравнина исто као што притиска узлазне површине. Ова разлика у притисцима на узлазне и силазне површине неравнина резултује појавом силе трења чак и у случајевима када су површине подмазане.



Слика 2.15 Однос напрезања и деформације без (а) и са хистерезисом (б)

Приликом транслаторног кретања гуме по тврдој храпавој површини, неравнине подлоге ће изазвати пулсирајуће деформације гуме, што доводи до вискоеластичне дисипације (расипања) енергије у већем делу гуме, што представља значајан део трења. Овај механизам дисипације енергије се често назива вискоеластично трење или хистерезисни удео трења.

Скоро сви полимери показују вискоеластичност под одређеним условима оптерећења и нивоима напрезања, односно напрезање полимера зависи од брзине напрезања, као и од самог напрезања. Многи полимери се могу класификовати као гуме, а вискоеластичност је од велике важности за трибологију гума. Основни концепт вискоеластичности је илустрован на Слика 2.16, где је контакт, без подмазивања, неравнине две површине представљен серијом еквивалентних опруга и пригушивача. Иако ова аналогија није савршена, модел добро илуструје природу сила које делују између неравнина чврсте површине и вискоеластичног елемента у контакту [26].

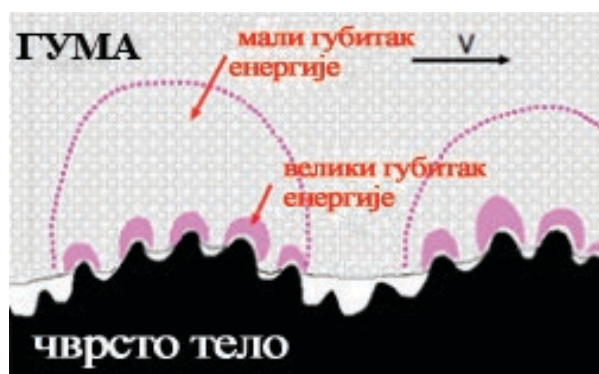


Слика 2.16 Механичка аналогија вискоеластичног контакта [26]

Као што се види са Слика 2.16, силе, посебно тангенцијалне, тј. силе трења, између неравнина постају директна функција брзине клизања.

Персон (Persson) [25] је проучавао трење гуме за гумени блок који клиза на тврдој и грубој површини са храпавошћу на бројним различитим дужинским скалама (таласним дужинама). Препоручује се укључити све дужинске скале храпавости у анализу, јер могу бити једнаке важности. На пример, компонента храпавости кратке таласне дужине са таласном дужином λ_1 и амплитудом h_1 може дати исти допринос као компонента са дугом таласном дужином са λ_0 и h_0 ако је однос $h_1/\lambda_1 = h_0/\lambda_0$.

Дисипирана (расута/изгубљена) енергија по јединичној запремини, како је приказано на Слика 2.17, највећа је у областима контакта са малим неравнинама.



Слика 2.17 Вискоеластична деформација гуме због неравнина површинске храпавости подлоге на две различите скале дужина [25]

На основу наведених и других истраживања, адхезиона и деформацијска компонента трења гуме су веома вискоеластичне. Ово значи да величина силе трења, коју генеришу вискоеластична тела, зависи од неколико фактора: величине агрегата на површини пута, брзине пенетрације (задирања) агрегата у гуму и брзине клизања гуме преко тог агрегата. Ово указује да трење гуме углавном потиче од унутрашњег хистерезиса у гуми [25].

2.2.4.3 Кидање и хабање

Поред трења које је изазвано адхезијом и деформацијом, гума производи трење кидања и хабања. Када гума клизи по површини, долази до хабања гуме, при чему се

формирају мале честице гуме уз ширење пукотина. Повећањем деформационих сила и брзине клизања, локална напрегнућа могу превазићи затезну чврстоћу гуме, посебно у близини оштрих неравнина. Ово може довести до деформације унутрашње структуре гуме и прелаза границе еластичности.

Када су полимерни ланци и попречне везе гуме напрегнуте до напона разарања, гума више не може комплетно да се врати у своје првобитно стање, што узрокује кидање. Процес кидања апсорбује енергију, што додатно повећава силу трења у контакту.

Хабање представља крајњи стадијум кидања гуме. Када се локални напони повећају до величине која прелази почетно кидање или дејствују дуже време, то може довести до раскидања материјала. У тим случајевима, јављају се одломци гуме који се одвајају од основне структуре.

2.3 Трење између обуће и подлоге

Ходање људи по различитим подлогама и у различитим условима, као што су суве, мокре или ледене површине, значајно зависи од трења између обуће и подлоге. Многе повреде које људи доживе су резултат падова који настају због проклизавања при ходању. Ово је често условљено недостатком силе отпора, односно трења између обуће и подлоге.

Произвођачи спортске опреме или заштитних средстава за специјалне и отежане услове рада активно се баве решавањем ових проблема. Истражују се и развијају различите технологије и материјали који могу побољшати трење и сигурност при кретању на различитим врстама површина.

У Немачкој, у 2011. години, забележено је око 90.000 случајева повреда које су настале услед проклизавања током ходања, што је резултовало трошковима од око 2 милијарде евра. Падови услед клизања су чести на радним местима, а према извештајима организације HSE (Health and Safety Executive) [34], велики број несрећа се догађа када су површине подова контаминиране водом, прашином, машћу, уљем и другим супстанцама. У истраживању организације HSE, утицајни параметри код падова укључују тип површине, ниво контаминације, врсту обуће, начин ходања, стање чистоће и опште услове околине.

2.3.1 Основни триболошки параметри у контакту обуће и пода

Трење и хабање у контакту обуће и подлоге зависе значајно од следећих параметара [29]:

- кључних триболошких карактеристика, као што су својства материјала обуће и пода и релевантне трибо-механичке и хемијске карактеристике компоненти система (адхезија и деформација);
- експлоатационих променљивих као што су нормално оптерећење, кинематика и кинетика, брзина, трајање експлоатације и контактни угао;
- триболошког контакта између обуће и пода, као што су развој хабања, изазвана оштећења и трансфер материјала.

При истраживању трења, добијени трибометријски подаци морају се разумети као карактеристике триболошких система повезане са следећом групом параметара [35]:

- Структурни параметри, који карактеришу компоненте (материјале, стање подлоге који могу бити суви, влажни и са сапуницом) укључене у процес трења и њихова физичка, хемијска и технолошка својства.
- Оперативни параметри, односно, услови оптерећења (контактни притисак), кинематике и температуре и њихово функционално трајање (брзина).
- Параметри интеракције, који карактеришу деловање оперативних параметара на структурне компоненте триболошког система и дефинишу његове контактне и подмазивачке режиме.

Структурни параметри укључују трибоелементе, међуповршинске елементе као што су мазиво или честице прљавштине, и средину околине као што су ваздух или влага.

Структурни параметри могу се поделити на:

- Геометријске параметре (геометријске димензије, топографија површине, итд.);
- Микроструктурне параметре (величина зрна, густина дислокација, итд.);
- Механичке параметре (модул еластичности, тврдоћа трибоелемената; вискозитет и вискозитет-притисак контактних елемената и средине околине, итд.);
- Хемијске параметре (волуменски састав и површински састав трибоелемената; састав међуповршинских елемената и средине околине као што су киселост и влажност, итд.);

- Физичке параметре (густина, топлотна проводљивост, итд.).

Основни оперативни параметри у трибологији [35] су:

- Тип кретања (клизање, котрљање, ротација и удар; кинематика може бити континуирана, прекидна, реверзна или осцилирајућа);
- Оптерећење, које је дефинисано као укупна сила (укључујући тежину) која делује нормално на контактну површину између трибоелемената;
- Брзина, која се одређује у односу на векторске компоненте и апсолутне вредности појединачних кретања трибоелемената;
- Температура структурних компоненти на наведеном месту и времену, односно почетна (стационарна) температура и повећање температуре узроковано трењем;
- Зависност од времена скупа оперативних параметара;
- Трајање рада или теста.

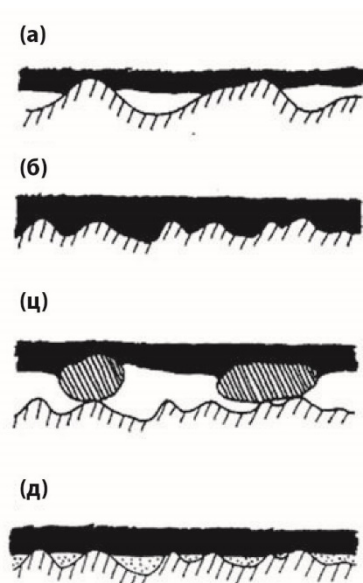
Механизам трења гуме се у многим аспектима разликује од механизма трења већине других чврстих материјала због веома ниског модула еластичности гуме и високог унутрашњег трења. У случају контакта између гуме и тврде површине трење значајно зависи од оптерећења и геометрије површина [15]. Гума је еластичан материјал и ако су клизне површине равне (тако да долазе у контакт у многим контактним тачкама), површина контакта и сила трења су скоро директно пропорционалне оптерећењу.

Конструктори и произвођачи подова, посебно јавних пешачких површина, морају да узму у обзир безбедност људи у кретању. У том контексту, неопходно је да се у процес конструисања укључи триболошки аспект производа [36]. Произвођачи обуће се суочавају са изазовом да развију удобну и дуготрајну обућу која одговара различитим условима коришћења и различитим захтевима корисника. Постоји широк спектар врста обуће, свака са својим специфичним карактеристикама и захтевима. На пример, спортска обућа мора да одговара врсти спорта и различитим типовима подлога, док је заштитна радна обућа дизајнирана да пружи специфичну заштиту у радним условима.

Један од најважнијих елемената обуће који има одлучујући утицај на противклизну карактеристику је ђон и он се често израђује од различитих материјала као што су разне врсте гуме, пластике, коже и других материјала. Његова рељефна структура игра кључну улогу у спречавању клизања и осигуравању добре противклизне

својствености обуће. Ове структуре су дизајниране да осигурају добар контакт са подлогом у различитим условима, од сувих до мокрих или тврдих до неравних површина.

При контакту између гуменог ђона ципеле и пода, највише утицаја имају параметри као што су храпавост пода, тврдоћа гуме, хистерезис гуме, брзина клизања, нормално оптерећење и услови површине (сува, мокра, подмазана).



Слика 2.18 Гума у контакту са тврдом подлогом и храпавом површином [31]

Када тврда челична лопта клизи преко чисте гумене површине, доминира механизам трења адхезијом између површина. Када су површине добро подмазане, доминира механизам трења деформације гуме услед губитака због хистерезиса гуме [15]. Сила трења између гуме и храпаве (тврде) површине може се описати адхезивним и хистерезисним компонентама [31].

Контакт гуме и тврде подлоге са храпавом површином приказан је на Слика 2.18 у различитим условима [31]. Гума на тврдој подлози са храпавошћу површине дуге таласне дужине приказана је на Слика 2.18а. Због адхезије на подлогу, гума у контактної области се деформише како би у потпуности пратила профил храпавости површине кратке таласне дужине подлоге Слика 2.18б. Гумена површина посута малим честицама које клизе на тврдој подлози приказана је на Слика 2.18ц. гума која клизи на површини покривеној водом приказана је на Слика 2.18д.

2.3.2 Триболошка мерења код обуће и пода

Триболошка мерења представљају кључни аспект трибологије, науке која проучава трење, хабање и подмазивање између контактних покретних површина. Ова мерења су од суштинског значаја за разумевање како различити материјали и услови утичу на перформансе система у којима долази до трења и хабања, као и за развој ефикасних метода подмазивања и заштите од хабања. Триболошка мерења се изводе у разним областима, од аутомобилске и машинске, до медицинске и електронске индустрије. У овој дисертацији разматрају се основни принципи триболошких мерења, њихов значај, као и технике и инструменти који се користе у овим истраживањима [37].

Триболошка мерења обухватају различите параметре, укључујући мерење трења, хабања и подмазивања. Ова мерења пружају увид у механизме који се дешавају на микро и макро нивоу у контактним зонама.

Трење представља отпор који се јавља када се два тела крећу једно у односу на друго. У триболошким мерењима, трење се мери као сила која делује супротно смеру кретања, а која се обично изражава преко коефицијента трења. Коефицијент трења се добија као однос силе трења и нормалне силе која делује између контактних површина. Овај параметар је важан јер даје информације о томе колико је одређени систем ефикасан, односно колико енергије се губи услед трења.

Хабање је процес постепеног уклањања материјала са површина у контакту услед механичког деловања, било да је узроковано трењем, ерозијом, корозијом или другим факторима. Триболошка мерења хабања често укључују праћење губитка масе или волумена материјала, дубине продора или промене у геометрији површине током времена. Овај тип мерења помаже у одређивању трајности материјала и начина на који материјал подноси механичка оптерећења у различитим условима [38].

Подмазивање има кључну улогу у смањењу трења и хабања, а триболошка мерења у вези са подмазивањем утврђују како различите врсте мазива утичу на перформансе система. Мере се параметри као што су вискозност, дебљина филма мазива и температура, како би се одредило у којој мери мазиво спречава директни контакт између површина и тиме смањује трење и хабање.

Триболошка мерења захтевају употребу прецизних инструмената и техника за одређивање различитих параметара. Најчешће коришћени уређаји укључују трибометре, профилометре и различите типове микроскопа.

Трибометри су уређаји који се користе за мерење трења и хабања у контролисаним условима. Постоје различите врсте трибометара, као што су клизни трибометар (где два тела клизају једно преко другог) и ротациони трибометар (где се једна површина ротира у односу на другу). Трибометар омогућава праћење силе трења током времена и мерење губитка материјала као последице хабања.

Профилометри се користе за мерење микро-геометрије површине након одређеног периода хабања. Они омогућавају детаљан преглед микрохрапавости и промене у површинском профилу, што помаже у разумевању механизма хабања и идентификовању појава као што су пукотине, усеци или локално топлеење материјала.

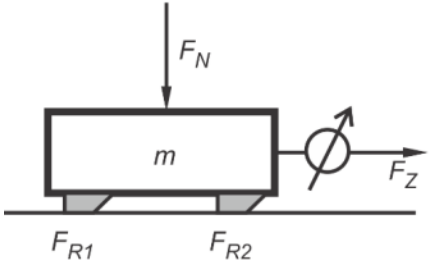
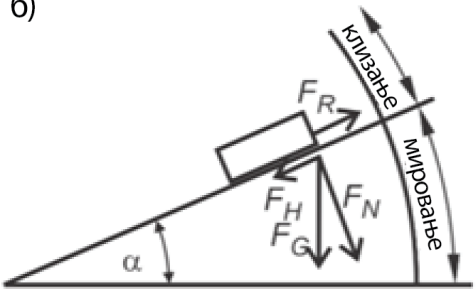
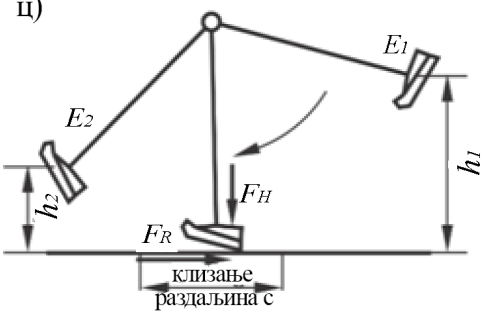
Оптички и електронски микроскопи омогућавају детаљну анализу хабања на микро и нанометарским скалама. Они се користе за испитивање површинских деформација, пукотина и оштећења насталих током процеса трења. Микроскопске технике су важне за разумевање триболошких процеса на нивоу структуре материјала.

Триболошка мерења имају широку примену у индустрији. У аутомобилској индустрији, мерење трења и хабања се користи за оптимизацију компоненти мотора, кочионог система и других делова који су подложни механичком оптерећењу. У медицинској индустрији, триболошка мерења су важна за проучавање биомедицинских имплантата, као што су вештачки зглобови, где је дуговечност материјала од суштинске важности. У електронској индустрији, мерења трења и хабања су неопходна за развој минијатурних уређаја као што су микроелектромеханички системи.

2.3.3 Основни принципи мерења отпорности на клизање обуће и подлоге

Основни принцип одређивања отпорности на клизање обуће и подних површина је тестирање реалних материјала у реалним условима, узимајући у обзир триболошке карактеристике. Постоје различити европски стандарди који прописују различите методе тестирања и системе оцењивања [39] [40] [41] [42] [43].

Табела 2.2 Принципи за одређивање коефицијента трења

a) 	$\mu = \frac{F_{R1} + F_{R2}}{F_N} = \frac{F_z}{m \cdot g}$
б) 	$\mu = \tan \alpha$
ц) 	$\mu = \frac{m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}{s \cdot F_N}$

Најстандарднији тест заснован је на три принципа Табела 2.2. Први је метод вучног теста табела 2.2а, заснован на мерењу вучне силе тј. силе трења, а затим рачунању коефицијента трења са познатом нормалном силом. На табели 2.2б је метод стрме равни, где се одређује угао почетка кретања, а затим рачуна коефицијент трења. Трећи метод (табела 2.2ц) познат је као тест са клатном, где се коефицијент трења одређује на основу губитка енергије узрокованог трењем између узорка ђона обуће и пода. Тестирање и

оцењивање противклизних карактеристика обуће и подних површина има велики значај за превенцију несрећа узрокованих падовима. Током година развијено је више различитих метода и уређаја за мерење отпорности на клизање подних површина и обуће. Различите европске земље прихватиле су различите методе тестирања и системе оцењивања. Будући да су ови тест методи базирани на различитим принципима и користе се у различитим условима, нема корелације између њих. Ниједан од постојећих тестова није савршен. Сви имају своје предности, али и недостатке [44].

Метод испитивања трибометра базиран је на мерењу силе трења. Тело опремљено клизачима вуче се константном брзином по површини пода. Сила потребна да се вуче тело одређује за дужину мерне удаљености. Пример трибометара у складу са нормама DIN 51131 приказан је на Слика 2.19.



Слика 2.19 Пример трибометра за тестирање

За одређивање коефицијента трења код плочица, ова сила се дели нормалном силом. Ово тестирање се може вршити и у сувим и у мокрым условима како у лабораторији тако и на терену. Овај уређај се користи у Немачкој, Пољској и Аустрији [45].

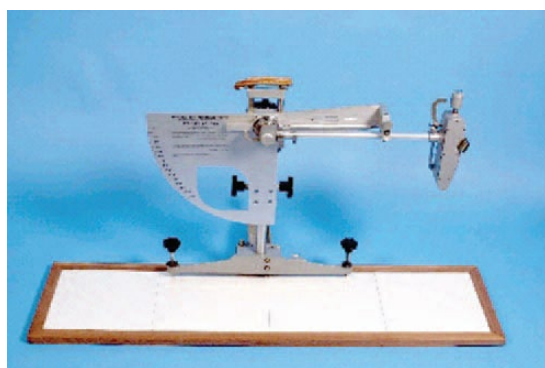
Метода за мерење отпорности на клизање обуће описана је у стандарду EN 13287 [46]. Обућа која се испитује поставља се на основу од керамичке плочице или челичног пода и изложена је одређеној нормалној сили, Слика 2.20. Основа се хоризонтално помера и долази до појаве клизања обуће.



Слика 2.20 Опрема за тестирање отпорности на клизање обуће

Коефицијент кинетичког трења се рачуна на основу измерене силе трења. Глицерин или раствор натријум лаурил сулфата делују као контаминант на површини. Произвођачи и дистрибутери заштитне обуће обично су обавезни да тестирају своје производе према стандарду EN ISO 13287. Међутим, произвођачи и дистрибутери других типова обуће ретко наводе својства отпорности на клизање својих производа. У ретким случајевима они рекламирају отпорност на клизање својих производа позивајући се на стандарде EN ISO 13287 и DIN 51130.

Произвођачи и дистрибутери спортских подних покритаца при презентовању својих производа обично се позивају на стандард EN 13036-4 [40] (Пендулумски тест Слика 2.21). Произвођачи и дистрибутери ламинатних и текстилних подних подлога најчешће се позивају на стандард EN 13893 [41].



Слика 2.21 Пендулум трибометар

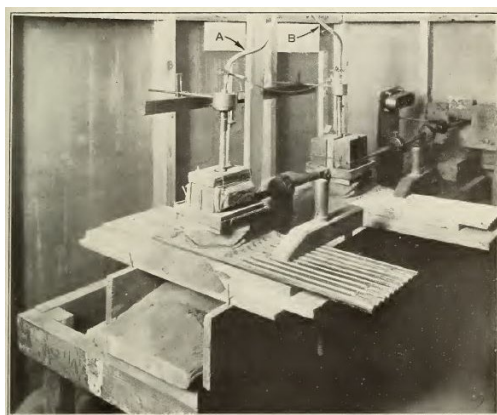
Остали произвођачи и дистрибутери подних подлога користе стандарде DIN 51131, DIN 51130 и DIN 51097 (Слика 2.22).



Слика 2.22 Рамп тест

3. Преглед истраживања у области триболошких карактеристика гуме

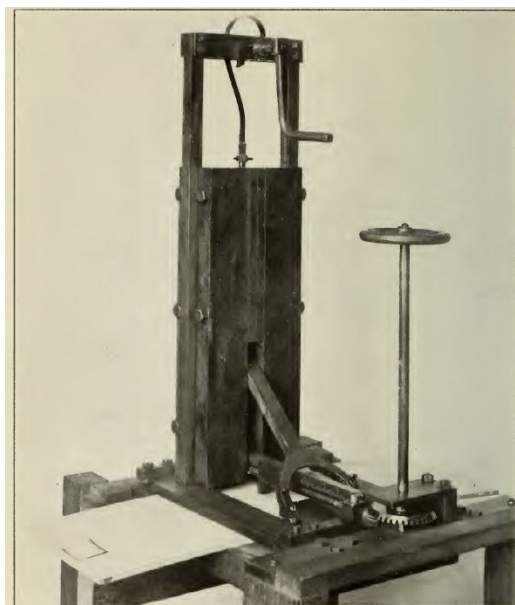
Истраживање коефицијента трења између обуће и подлоге се спроводи у задњих 100 година. Са развојем различитих врста обуће и материјала од којих се праве, као и различитих материјала подлоге све више се развијала потреба да се испитује трење између обуће и подлоге. Први писани рад датира из 1929. године и описује уређај и методе за мерење коефицијента трења између обуће и подлоге у различитим условима. Аутор рада је R. B. Hunter [47] и у њему се наводи да је 1924. Америчка Асоцијација за стандарде покренула пројекат за утврђивање коефицијента трења између различитих обућа и врста подлога. У циљу утврђивања коефицијента трења развијене су методе и уређај за одређивање коефицијента трења. Истраживања су вршена у периоду од 1924.-1928. за различите материјале обуће и подова који су се користили у то време. Подлоге су биле разне врсте камена, дрвета, вештачког камена, метала. Услови су били на сувом, влажном, уљем подмазаном површином, док су ђонови били углавном од коже и гуме. Сви материјали за испитивање су се претходно припремали, шмирглали, чистили а затим били подвргнути тестирању на уређају специјално конструисаном за ту сврху.



Слика 3.1 Уређај за припрему узорака [47]

Слика 3.1 приказује уређај за припремање узорка ђона за тестирање. Узорак се прво обрађује абразивним папиром (шмирглом) са 10.000-80.000 пролаза. После половине процеса, сваки узорак се ротира за 180 степени како би се обезбедило подједнако хабање. После процеса припреме (хабања) долази чишћење узорака од остатака песка и исхабаног материјала, затим се понавља процес без присуства абразивног средства у обиму од 10.000 циклуса. Последњи корак је чишћење млазом воде, брисање влажном

крпом и на крају сушење. Тако припремљени узорци се тестирају на коефицијент трења на уређају приказаном на Слика 3.2.



Слика 3.2 Уређај за одређивање коефицијента трења [47]

У даљем току истраживања може се видети да се методе припреме узорака као ни параметри нису много променили до данашњих дана. Одређивање коефицијента трења се вршило уз варијацију параметара тежине, номиналне површине контакта, температуре и влажности ваздуха.

У новије време, последњих 50 година, испитивања у овој области се интензивирају. Уводе се нови параметри, користе се нови материјали за производњу обуће и подлоге, услови експлоатације се мењају. Све више страна је заинтересовано за испитивања у овој области. У западним земљама носиоци пројеката за испитивање су обично осигуравајућа друштва која су директно погођена трошковима услед падова насталих клизањем. Поред осигуравајућих друштава испитивања иницирају и национални институти који се баве безбедношћу становника и радника на радним местима.

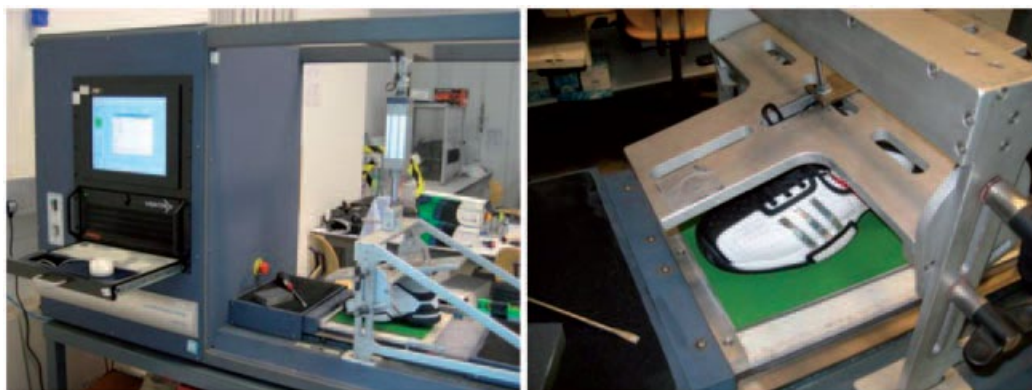
Тако су се у протеклом периоду развиле различите методе и уређаји за испитивање коефицијента трења.

Аутори су се бавили испитивањем различитих параметара који утичу на појаву клизања између обуће и подлоге, односно њиховог утицаја на коефицијент трења.

Тако група аутора [4] истражује компоненте адхезионог и хистерезисног трења између обуће и пода у граничним условима подмазивања детерџентом. У испитивању се користе

Ћонови различите тврдоће (40, 60 и 70Sh), две подлоге (винил и гранит) и шест различитих средстава за подмазивање (вода, раствори детерџената са варијацијом процента воде, канола уља). Одређивање коефицијента трења врши се на трибометру типа пин он диск, специјално развијеном за ово испитивање. Узорци код којих се испитује трење су цилиндричног облика, пречника 10mm без текстуре. У испитивањима нема промене брзине и нормалног оптерећења. Нормално оптерећење је 20.9N док је брзина клизања 0,01m/s. Узорци су припремани абразивним папиром између сваког мерења које је трајало 10s. Анализа података и утицај параметара као и предвиђање коефицијента трења вршен је Анова регресионом методом. Аутори закључују да хистерезис на коефицијент трења значајно утиче преко односа тврдоће ђона и подлоге. Глатки материјали за ђонове дају највећу адхезиону компоненту коефицијенту трења на сувом. Најхрапавији материјал који је и најмекши даје најмањи допринос адхезионој компоненти на сувом. Полиуретан задржава бољу адхезију у односу на гуму у условима са подмазивањем. Средства за подмазивање састављена од молекула са дугачким ланцима смањују адхезију. Регресиони модел који укључује два параметра течности и суву адхезију је ефикасан у предвиђању адхезије са подмазивањем [4].

Аутори [48] су испитивали утицај храпавости на триболошка својства у интеракцији спортске патике и тениског терена. У овом испитивању се истражује утицај храпавости тврде тениске подлоге од акрила на клизање патике код спортиста. Варирају се пет различитих храпавости подова, нормалне силе од 400-800N и ђон обуће са и без текстуре. Ђон са шаром је у облику рибље кости и тврдоће 75Sh док је раван ђон тврдоће 96Sh.



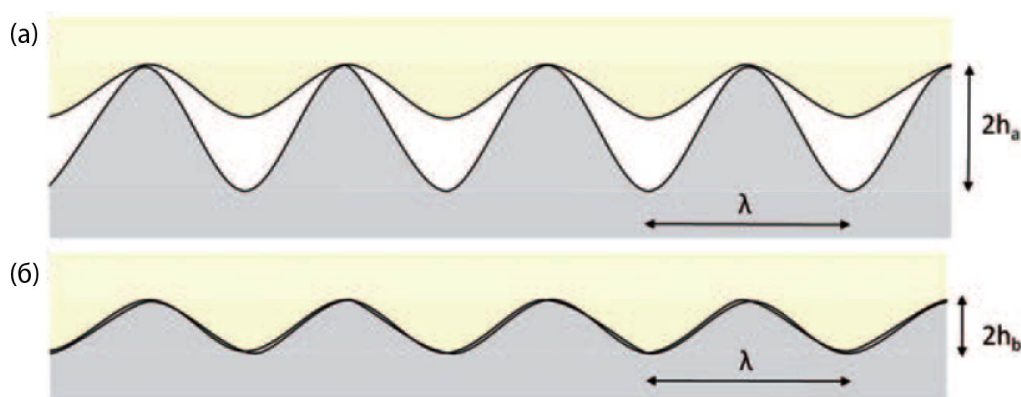
Слика 3.3 Опрема (САТРА) за тестирање коефицијента трења на тениској подлози [48]

Слика 3.3 приказује опрему за тестирање коефицијента трења на тениској подлози и комерцијалне патике за тенис произвођача „адидас“.



Слика 3.4 (лево) Ђон текстуре у облику рибље кости, (центар, десно) раван ђон од гуме [48]

Слика 3.4 приказује слике ђонова коришћених у овом експерименту. Поред утицаја храпавости подлоге аутори износе и утицај хистерезисног и трења адхезије у зависности од храпавости и нормалне силе.



Слика 3.5 Контакт гуме и подлоге за исту нормалну силу. (а) површина веће храпавости смањује реалну површину контакта (б) површина мање храпавости повећава реалну површину додира [48]

Код равног ђона ципеле од 4С гуме, коефицијент трења постаје мање зависан од нормалне силе како се повећава храпавост, због смањеног утицаја адхезије. Код ципеле Barricade 6.0 (Адидас) за све површине и код ципеле 4С између површина А и Д, постоји тренд опадања коефицијента трења са повећањем храпавости, јер се ефекти адхезије смањују услед смањења контакта између неравнина. За ципелу 4С постоји прелаз између храпавијих површина Д и Е, где се трење повећава. Овај прелаз може бити тачка у којој хистерезисни и абразивни механизми хабања постају доминантни. Повећање трења уочено код ципеле 4С (између површина Д и Е) није уочено код ципеле Barricade 6.0 (Адидас). Ово може бити због разлика у контактної површини, саставу гуме и/или обрасцу шара на ђону, што захтева даље истраживање. Као и претходни аутори у истраживању [49] испитује се утицај храпавости али на различите стандардизоване

методе за одређивање коефицијента трења код керамичких плочица. У експерименту се користи осам различитих керамичких плочица за различитом храпавошћу (глазиране, полиране, необрађене). За одређивање коефицијента трења користе се клатно (пендулум тест), уређај BOT 3000-E и уређај за динамичко тестирање произвођача Gabbrielli. Анализа података се врши ANOVA методом и добијени резултати показују да за влажне услове храпавост од $R_z=25\mu\text{m}$ даје безбедне коефицијенте трења без обзира на методу (уређај) којим се мери. Као резултат анализе варијансе и евалуације графичког односа између R_z и трења, аутори закључују да се параметри храпавости могу користити као показатељ коефицијента трења површина. Анализа варијансе параметара храпавости показала је да су параметри имали значајан утицај на коефицијент трења добијен свим разматраним методологијама, при чему је постигнут ниво значајности од 95%. Резултати су показали да се параметри храпавости, нарочито R_z , могу користити за предвиђање коефицијента трења и да прате једначину трећег степена [49].

Arjan Iraqi [50] и остали коаутори су испитивали утицај различитих параметара на коефицијент трења између обуће и подлоге и његово предвиђање. Они су испитивали 63 различите брендиране ципеле (патике) у условима присуства канола уља. Параметри који су били анализирани у истраживању су: облик и ширина петног дела ђона, тврдоћа материјала, храпавост подлоге и ђона, дубина шаре на обући, отисак ђона (мерен помоћу мастила за штампу) и механичке карактеристике. Мерења коефицијента трења извршена су у присуству контаминанта. Анализа резултата и предвиђање коефицијента трења вршена је помоћу Анова методе. Нормална сила је била 250N, а брзина клизања 0,5m/s. Мерење коефицијента трења вршена су помоћу Portable Slip Simulator-а. Помоћу Анова методе се одређује и колико који параметар утиче на коефицијент трења. Студија сугерише да ципеле отпорне на клизање са заобљеним обликом пете, већом површином шара на ђону и мањом тврдоћом материјала генеришу веће трење у присуству уља од репице. Поред тога, креиран је вишеструки регресиони модел који предвиђа коефицијент трења при контакту (ACOF) на основу ових параметара. Овај тип предиктивног модела може бити користан стручњацима за безбедност у избору ципела са бољим перформансама трења [50].

Група аутора [6] проучавала је силу трења на гуменом блоку који клизи по асфалтној површини пута. Коефицијент трења измерен на три различите температуре у широком опсегу брзина могао је бити померен да формира глатку мастер криву коришћењем температурно-фреквентног фактора померања, добијеног из мерења волуметријског вискоеластичног модула.

Коефицијент трења је измерен клизањем правоугаоног гуменог блока ($2 \times 2 \text{ cm}^2$), дебљине 5 mm , у праволинијском кретању преко површине пута. Гума која се испитује је смеша која се користи за летње гуме путничких возила. Номинално оптерећење на узорку гуме износило је 26 N , што доводи до номиналног притиска сабијања од $\sigma_0 = 0,065 \text{ MPa}$. Када се достигне стабилна вредност трења након уравнотежења, сила трења, а самим тим и коефицијент трења, мере се при константној брзини.

Аутори [6] су анализирали податке користећи модел у којем се трење састоји из дела вискоеластичне деформације услед интеракције са неправилностима на површини пута и доприноса од смицања контактне површине. На малим брзинама, и за релативно глатку површину пута коју су користили, утврдили су да доминира допринос од контактне површине, док при већим брзинама клизања доминира деформација неправилности. Закључују да допринос трењу из контактне површине настаје услед смицања танког (нанометарског) ограниченог филма, вероватно филма размазане гуме.

Wetzel и коаутори [2] баве се прегледом метода за мерење коефицијента трења, принципима на којима уређаји раде, биомехаником хода, контаминантима који су присутни у контакту.

Аутори [51] су испитивали у лабораторијским условима варијације тврдоће и хистерезиса широког спектра гумених једињења типа газећег слоја гуме у зависности од температуре. Такође је проучаван утицај тврдоће и хистерезиса на триболошка својства ових једињења у влажним условима. У првој серији тестова, хистерезис и тврдоћа 25 једињења мерени су у температурском опсегу од 0°C до 80°C . Сва једињења су била вулканизовани типови газећег слоја гуме, а основни материјали обухватали су 14 природних гума, 7 гума од стирен-бутадијена (SBR), 2 бутилске гуме, 1 полибутадијен и 1 етилен-пропилен. Тестови су показали значајно повећање хистерезиса са повећањем температуре код свих једињења осим полибутадијена; тврдоћа свих једињења променила се врло мало са температуром, са тек благим смањењем у целокупном температурском порасту. Девет једињења, која су представљала различите нивое хистерезиса и тврдоће, одабрано је за другу серију тестова, у којима је трење мерено у температурском опсегу од 1°C до 40°C на седам различитих површина које представљају текстуре различитих путева. Код осам једињења, вредности трења су се смањивале са порастом температуре; код једног једињења трење је порасло до максималне вредности на 30°C . Ове промене у трењу не могу се објаснити променама у тврдоћи једињења, али су у складу са променама хистерезиса, узимајући у обзир различите услове тестирања који постоје у тестовима трења и хистерезиса.

Рад [52] описује теорију када гума клизи по тврдој, храпавој подлози, врхови на површини подлоге стварају осцилирајуће силе на површини гуме, што доводи до „дисипације“ енергије кроз унутрашње трење гуме и представља расправу о томе како сила трења која настаје зависи од природе храпавости површине подлоге и од брзине клизања. Детаљно се разматра случај када површина подлоге има неправилну фракталну структуру. Такође се износи теорија о стварној контактної површини, како за стационарна тако и за тела у кретању, са еластичним или еластопластичним својствима. Аутори [53] такође истичу да се трење у контакту између гуме и пута заснива се на два физичка ефекта. Храпавост асфалтне површине узрокује деформације у вискоеластичном материјалу гуме. Последица тога је дисипација енергије и трење. Овај ефекат се назива хистерезно трење или губици услед хистерезе. Интермолекуларне везе између материјала гуме и површине пута доводе до адхезионих сила, које такође узрокују дисипацију енергије и трење.

Из претходних истраживања може се закључити да су она рађена за различите параметре (набројане у њима), али и да нису рађена истраживања утицаја вредности хистерезиса гуме на коефицијент трења између обуће и подлоге. Зато је предмет ове докторске дисертације испитивање хистерезиса гуме која се користи за производњу ђонова и његов утицај на коефицијент трења.

Основни принципи за експериментално одређивање коефицијента трења између обуће и пода су: сила вуче, угао клизања (стрма раван) и губитак енергије (клатно). У различитим државама користе се различите методе и уређаји па су се тако и развили стандарди за испитивање ђонова и подлога. Сваки од ових стандарда има своје предности и недостатке. Тако се у неким државама користи стандард DIN 51130 са Рамп тестом, у Британији BS EN 13036-4 [40] као и трибометар по стандардима DIN 51131 [43] односно BS EN 13893. Произвођачи заштитне обуће у Србији најчешће користе испитивања по стандарду SRPS EN ISO 13287 [46]. Произвођачи спортских подова користе EN 13036-4, а керамичких плочица поменути DIN 51130 [42]. Лабораторијска испитивања коефицијента трења између обуће и пода спроводе се у условима најприближнијим реалним условима. Користе се познати материјали подлоге (плочице, ламинати, паркети, винил итд.) као и узорци различитих ђонова обуће (глатки, храпави, рељефни, израђени од различитих материјала). При испитивањима се мере кинетички и статички коефицијент трења.

Машинско учење (ML) и вештачка интелигенција (AI) постали су водећи трендови у многим научним дисциплинама и индустријама, а велика очекивања су усмерена ка

њиховом развоју. Слично томе, ML и AI приступи пронашли су примену и у трибологији, где могу помоћи у разумевању сложених образаца и идентификацији трендова унутар бројних интерактивних карактеристика и процеса.

Објављена истраживања покривају широк спектар области у трибологији, од композитних материјала и погона до производних технологија, инжењеринга површина и мазива. Сходно томе, намена и нумерички алгоритми су разноврсни, укључујући вештачке неуронске мреже (ANN), одлучујућа стабла, алгоритме насумичне шуме, алгоритме засноване на правилима и подржавајуће векторске машине (SVM) [54].

Аутори [55] користе GA-BP неуронску мрежу за предвиђање трења на површини лежаја и коефицијента трења у завртањским везама. Прикупљају податке о коефицијенту трења и затим их користе за обуку неуронске мреже. Рад аутора [56] је занимљив јер разматра предвиђање коефицијента трења између гуме аутомобила и асфалта. Они користе модел неуронске мреже оптимизован еволуционим алгоритмом ума (MEA-BP) за предвиђање коефицијента трења између гуме и пута, и упоређују га са алгоритмима екстремне машине за учење (ELM) и BP неуронске мреже. У истраживању су открили да се тачност предвиђања постепено побољшава с порастом броја улазних променљивих. Када број улазних променљивих достигне 12, стопа раста тачности се успорава. Још један рад са сличним истраживањем користи Елманову неуронску мрежу за идентификацију коефицијента трења пута [57]. У том раду предложен је метод идентификације коефицијента трења пута на основу Елманове неуронске мреже. У поређењу са традиционалним методом BP неуронске мреже, овај метод је смањio просечну апсолутну процентуалну грешку коефицијента трења пута за 2,24% и побољшао тачност за 9,82%. У овој дисертацији ће бити представљено истраживање предвиђања коефицијента трења коришћењем ANN у контакту између гуменог ђона ципеле и гранитне плочице. У чланку [58] развијена је неуронска мрежа побољшана генетским алгоритмом (GAI-NN). Тродимензионални (3D) подаци површинског облака тачака асфалтног коловоза добијени су коришћењем паметног сензора (Gocator 3110). Коефицијент трења коловоза затим је измерен коришћењем уређаја са клатном. GAI-NN модел је развијен модификовањем тежина и прагова. Резултати теста су показали да GAI-NN, користећи 3D податке текстуре површине коловоза, може предвидети коефицијент трења с довољном тачношћу, уз грешку од 12,1%.

У поређењу са алгоритмом Long Short-Term Memory (LSTM), комбинација PSO-GRU постигла је боље резултате: повећала је коефицијент детерминације (R^2) за 4,7%, смањила средњу апсолутну грешку (MAE) за 14,3% и убрзала предвиђања за 40,1%. Ова

метода није ограничена само на системе кочења, већ је применљива и на друге проблеме везане за трење, као што су предвиђање буке кочења и трења компоненти лежаја у преносним системима [59].

Још један интересантан чланак [60] бави се одређивањем коефицијента трења помоћу конволуционих неуронских мрежа (CNN) обучених да израчунавају вредности коефицијента трења. Представљено решење је засновано на паметним телефонима које помаже особама са оштећеним видом да се аутономно крећу у урбаним срединама. Ново предложени систем у овом раду има за циљ одређивање коефицијента трења (COF) тла ради помоћи у безбедном кретању слепих и слабовидих особа. Камера комерцијалног паметног телефона снима видео тла и шаље кадрове као улазе CNN моделу за сегментацију слике и израчунавање COF-а. Предложени систем заснован на ResNet50 CNN моделу постиже тачност од 96% у класификацији типова тла, омогућавајући навођење особа са оштећеним видом. У комбинацији са придруженим COF-ом типа тла, могуће је проценити ризик од пада (клизања) за следећи корак испред корисника на основу претходно измерене силе интеракције (коришћењем инструментализованог улошка) између тла и њона.

Аутори [61] моделирају коефицијент трења клизних површина у различитим условима температуре, напрезања и брзине клизања применом методологије вештачке неуронске мреже (ANN). Прво су извршена одређивања коефицијента трења за парове од најчешће коришћене легуре титанијума Ti6Al4V, у температурним условима на контакту од 20°C до 900°C, при нормалним напрезањима до 30MPa и брзинама клизања између узорака у распону од 178mm/s до 700mm/s.

Затим су измерене вредности коефицијента трења, заједно са релевантним измереним условима, коришћене за обуку одговарајуће архитектуре неуронске мреже. Након тога су спроведени додатни тестови како би се валидација перформанси вештачке неуронске мреже потврдила.

Утврђено је да тип неуронске мреже са радијалном базном функцијом (RBF) показује најзадовољавајуће резултате и делује као најприкладнија архитектура за процену коефицијента трења клизних површина.

Аутор [62] користи рекурентне неуронске мреже (RNN), посебно оне које користе архитектуру јединице са улазно-затвореним пролазом (GRU), имају способност да науче сложену динамику закона трења заснованих на брзини и стању, користећи синтетичке податке. Подаци који се користе за обуку мреже генерисани су применом традиционалних једначина трења заснованих на брзини и стању у комбинацији са

законом старења за еволуцију стања. Утврђено је да RNN са GRU архитектуром ефикасно учи да предвиђа промене у коефицијенту трења изазване скоковима брзине, чиме демонстрира потенцијал модела машинског учења у разумевању и симулацији физике процеса трења.

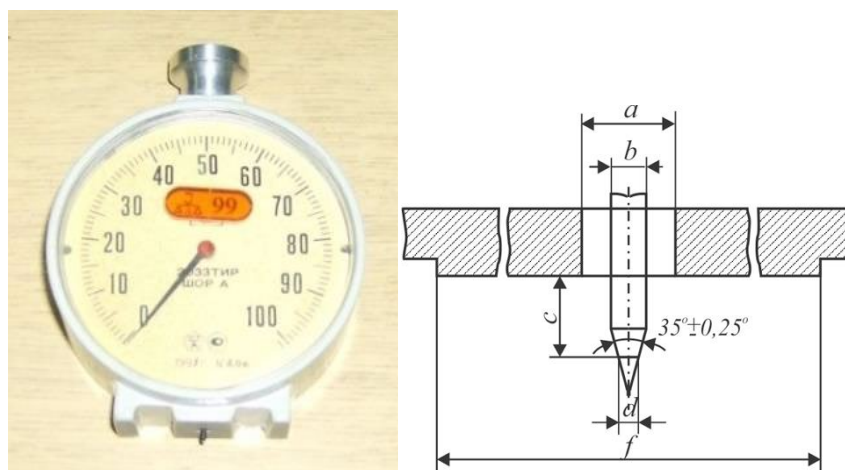
4. Експериментална истраживања

У експерименталном истраживању, у оквиру дисертације коришћене су три различите смеше гуме са тврдоћом од 65Sh (Метод А) и једна са тврдоћом 60Sh. Узорци за одређивање хистерезиса гуме су цилиндричног облика са пречником $\Phi 35,7\text{mm}$ и висином од 18mm . Интерне ознаке узорака су OB202, OB290, OB2280 и OB221. Узорци гуме су произведени од стране фирме произвођача ђонова за ципеле.

4.1 Одређивање тврдоће гуме узорака за испитивање

Пре експерименталног испитивања хистерезиса гуме, вршено је одређивање тврдоће узорака гуме. Узорци за одређивање тврдоће су исти као и за одређивање хистерезиса, па су и димензије исте $\Phi 35,7 \times 18\text{mm}$. Мерење тврдоће гуме дефинисано је различитим стандардима од којих су најчешћи: DIN 53505 [63], BS 903 [39]; ISO 7619 [64], ASTM D1415 [65] и SRPS G. S2. 125 којим је и извршено ово испитивање [66].

За потребе овог истраживања мерење тврдоће је извршено уређајем приказаном на Слика 4.1 Тврдомер Тип А [67].



Слика 4.1 Тврдомер Тип А [67]

Димензије и карактеристике тврдомера су [15]: а од $\Phi 2,5$ до $3,2\text{ mm}$, b $\Phi 1,25 \pm 0,15\text{ mm}$, c $2,5 \pm 0,04\text{ mm}$, d $\Phi 0,79 \pm 0,03\text{ mm}$, e $0,10 \pm 0,01\text{ mm}$, f $\Phi 16,0 \pm 2,50\text{ mm}$.

Како су узорци за утврђивање коефицијента трења малих димензија то се одређивање тврдоће вршило из трака димензија 300x300mm из којих су узорци за испитивање коефицијента трења исечени.

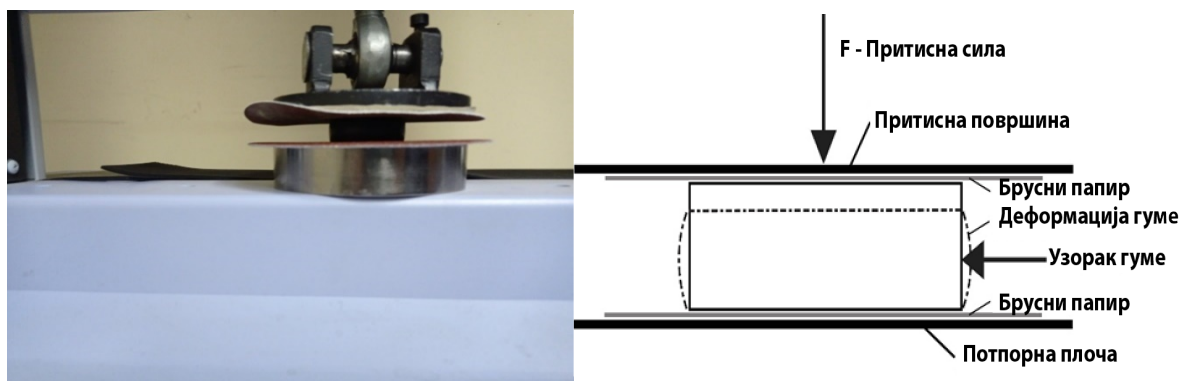
Табела 4.1 Измерене вредности тврдоће узорака

Ознака гуме	Тврдоћа(Sh)
ОВ 202	65
ОВ 290	60
ОВ 2280	65
ОВ 221	65

У Табела 4.1 приказани су резултати измерених вредности тврдоће узорака гуме за испитивање.

4.2 Одређивање хистерезиса гуме

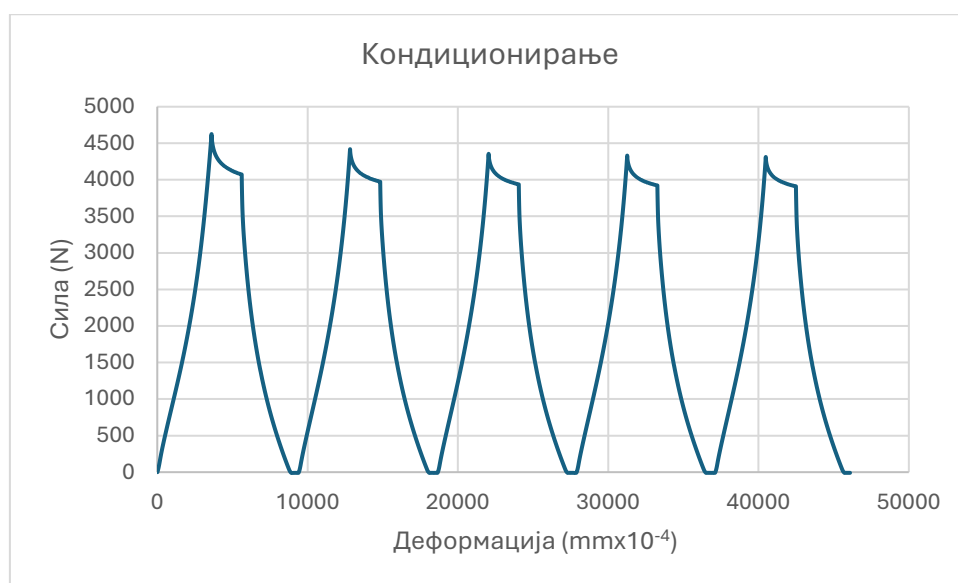
Мерно место за тестирање хистерезиса гуме за узорке, приказано на Слика 4.2, формирано је на Машинском факултету у Нишу на једноосној тест машини Shimadzu AGS-X типа са максималним оптерећењем од 10 kN.



Слика 4.2 Мерно место тестирања хистерезиса гуме

Пре тестирања, узорци су одлежавали на температури тестирања најмање 24 сата. Узорци су били постављени између два листа брусног папира како би се повећао коефицијент трења између притисних плоча машине и гуменог узорка, Слика 4.2. Како се притисак примењује аксијално, гумени цилиндрични узорак се деформише у правцу примењене силе, узрокујући да се странице деформишу ка споља и поприме буричаст облик као што је приказано на Слика 4.2. За тестирање хистерезиса гуме, било је

неопходно извршити кондиционирање узорка. Процес кондиционирања је изведен да би се полимерни ланци довели у стабилно стање, тј. кондиционирање разбија слабе везе између полимерних ланаца формианих током вулканизације гуме. Тај процес укључује пет циклуса примене вертикалне силе притиска брзином од 0.25 mm/s док се не достигне деформација до половине висине (9 mm), затим држање положаја машине 20 s, и након тога отпуштање притиска на узорак истом брзином у супротном смеру. На Слика 4.3 види се процес кондиционирања гуме OB2280. Ова операција је изведена за све узорке и неопходна је за припрему узорка за испитивање хистерезиса гуме. За сваку мешавину гуме тестирана су по три испитна узорка. Након периода кондиционирања, узорцима је дозвољено да одлеже 30 минута. Тестирање хистерезиса гуме састоји се од процеса примене вертикалне силе притиска брзином од 5 mm/min док се не достигне положај до половине висине (9 mm), а затим отпуштање силе истом брзином. Током тестирања, прикупљени су подаци о вредностима силе и деформације како би се добио механички одговор узорка.



Слика 4.3 Дијаграм кондиционирања узорка

На Слика 4.4 виде се узорци гумених смеша (са ознакама произвођача) на којима је вршено одређивање хистерезиса.



Слика 4.4 Узорци гуме за мерење хистерезиса

У Табела 4.2 да те су вредности хистерезиса, тврдоће и димензије узорака тестираних гумених смеша.

Табела 4.2 Карактеристике гумене смеше

Ознака гуме	Хистерезис	Тврдоћа (Sh)	Димензије
OB 202	0,35	65	Ø35,7x18mm
OB 290	0,46	60	Ø35,7x18mm
OB 2280	0,39	65	Ø35,7x18mm
OB 221	0,24	60	Ø35,7x18mm

4.3 Мерење храпавости плоча

Пре одређивања коефицијента трења извршено је и мерење храпавости плоча по којима се врши кретање (клизање) гумених узорака приликом испитивања силе трења. Како се у експерименту користе две врсте плоча глатка и противклизна (антислип) тако се приступило мерењу храпавости истих. Плоче су од гранитног материјала велике тврдоће, по Мосовој скали тврдоће 7. Мерење храпавости је вршено помоћу уређаја Mitutoyo SurfTest SJ-301. За сваку врсту плоча вршена су по 3 мерења.



Слика 4.5 Мерно место за одређивање храпавости гранитних плоча

На Слика 4.5 приказан је уређај (мерно место) за мерење храпавости плоча.

Параметри храпавости се могу поделити на више начина, а основна подела је: ако су коришћени профили храпавости за одређивање параметара онда се ради о линијским (2D) параметрима храпавости, а ако су коришћена 3D топографска мерења онда су то површински (3D) параметри храпавости. Линијски параметри храпавости се означавају са словом „R”, а површински параметри храпавости се означавају са словом „S” [68].

Један од најчешће коришћених амплитудних параметара храпавости је средње аритметичко одстојање профила (R_a), односно средња храпавост (S_a).

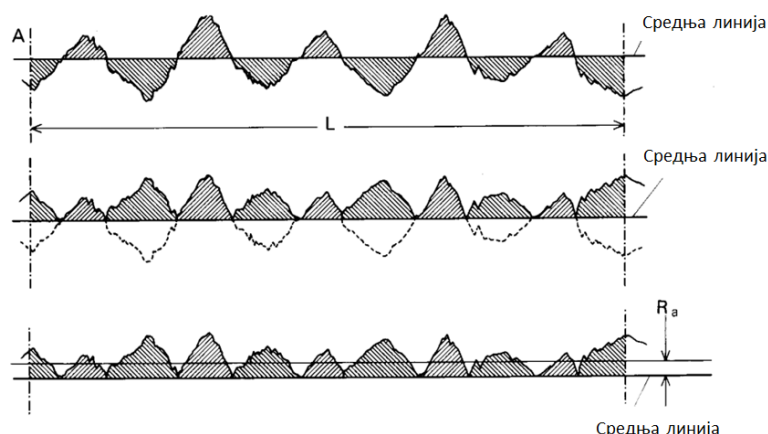
Средње аритметичко одстојање профила (R_a) представља средњу аритметичку апсолутну вредност одстојања свих тачака ефективног профила од средње линије у границама референтне дужине и одређује се формулом:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad 4.1$$

или

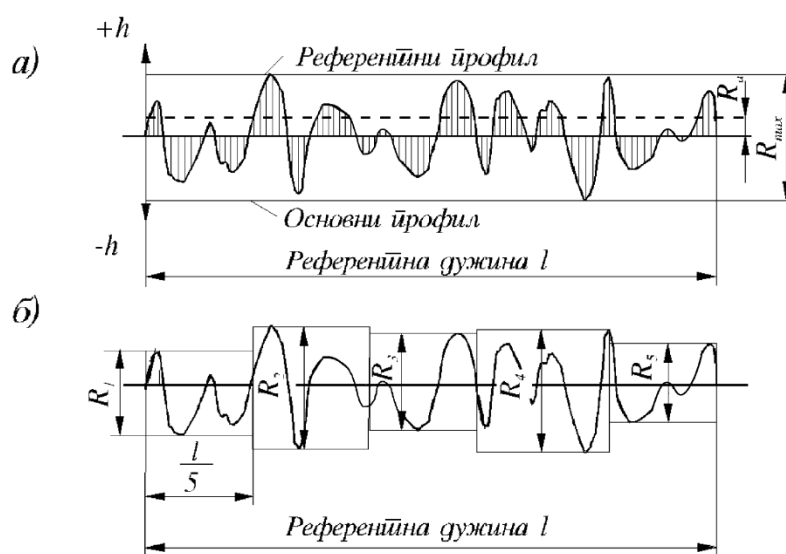
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad 4.2$$

На Слика 4.6 дат је графички приказ средњег аритметичког одстојања профила храпавости R_a .



Слика 4.6 Графички приказ средњег аритметичког одстојања профила R_a [11]

R_z – средња висина неравнина у 10 тачака представља разлику између средње аритметичке вредности висина 5 највиших и 5 најнижих тачака у границама референтне дужине, када се висине тих 10 тачака мере од произвољне праве која је паралелна са референтном правом која сече профил.



Слика 4.7 Графички приказ средње висине неравнина R_z хrapавости [69]

Једначина за израчунавање R_z гласи:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + \dots + R_9) \cdot (R_2 + R_4 + R_6 + \dots + R_{10})}{5} \quad 4.3$$

Табела 4.3 Измерене храповости глатке плоче

Глатка плоча	Ra (μm)	Класа храповости	Rz (μm)	Rmax (μm)
Мерење 1	0,03	N1	0,21	0,35
Мерење 2	0,03	N1	0,25	0,41
Мерење 3	0,03	N1	0,21	0,31

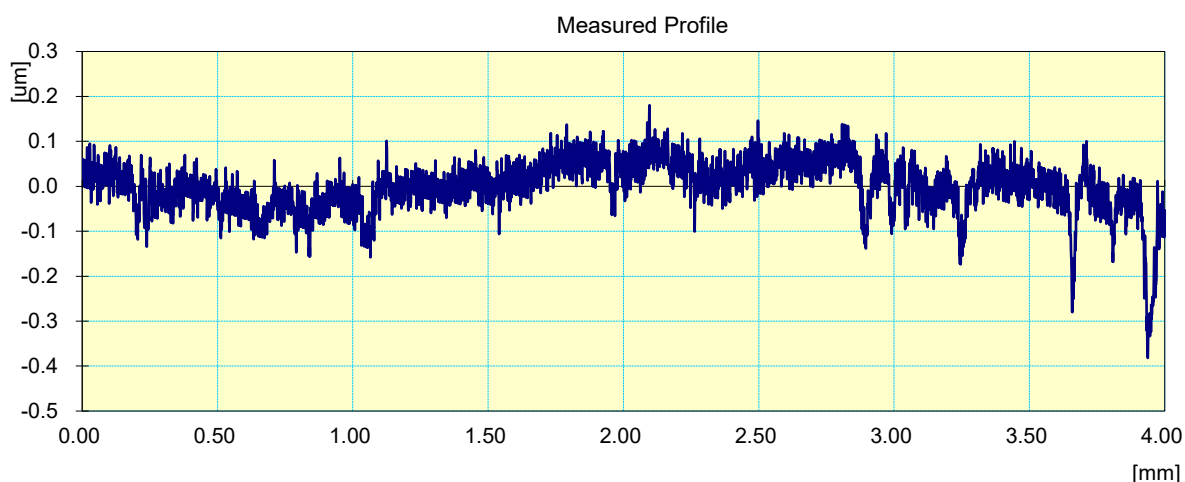
Табела 4.4 Измерене храповости противклизне плоче

Антислип плоча	Ra (μm)	Класа храповости	Rz (μm)	Rmax (μm)
Мерење 1	4,07	N8	12,74	17,59
Мерење 2	4,78	N8	16,73	21,50
Мерење 3	4,69	N8	17,40	25,24

Средња висина неравнина у 10 тачака представља разлику између средње аритметичке вредности висина 5 највиших и 5 најнижих тачака у границама референтне дужине, када се висине тих 10 тачака мере од произвољне праве која је паралелна са референтном правом која сече профил.

Табела 4.3 и Табела 4.4 приказани су резултати мерења храповости плоче.

На Слика 4.8 приказан је запис мерења храповости глатке плоче.



Слика 4.8 2D запис мерења храповости глатке плоче уређајем Mitutoyo SurfTest SJ-301

Резултати измерене храповости показују да је глатка плоча веома мале храповости (приближно стаклу) док противклизна (антислип) плоча значајно веће храповости. Са оваквим одступањем у храповости обезбеђује се да утицај храповости на коефицијент трења буде приметан. Обзиром на измерене храповости очекује се да код глатке плоче на коефицијент трења доминантно утиче адхезија док код противклизне плоче утиче

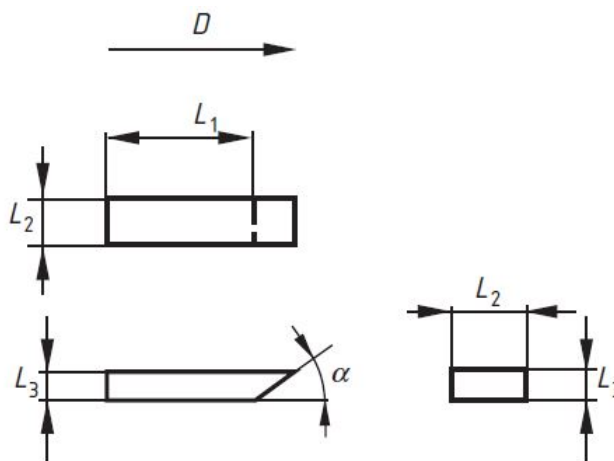
деформациона компонента, нарочито у условима подмазане површине (водом и сапуницом).

4.4 Експериментално одређивање коефицијента трења

Одређивање коефицијент трења у овој дисертацији је вршено према стандарду СРПС ЕН 13893:2011 [41]. Према овом стандарду су дефинисани услови под којима се одређује коефицијент трења између подлоге (отпорних подних прекривача, ламинатних и текстилних) и узорака ђонова обуће.

Принцип одређивања коефицијента трења је следећи: Клизачи направљени од дефинисаног материјала и одређеног облика оптерећени су како би на подну облогу деловала нормална сила. Оптерећени клизачи се повлаче паралелно са површином подне облоге константном брзином. Хоризонтална сила која се примењује за повлачење клизача бележи се дуж целе стазе. Хоризонтална сила се дели са вертикалном силом како би се добио динамички коефицијент трења.

Уређај којим се вуку узорци по подлози мора имати константну брзину од 0,2-0,3mm/s са одступањем до 0,01m/s. Дужина на којој се врши мерење мора бити најмање 0,3m. Сензор за мерење хоризонталне силе (силе трења) мора имати максималну грешку од 1%.



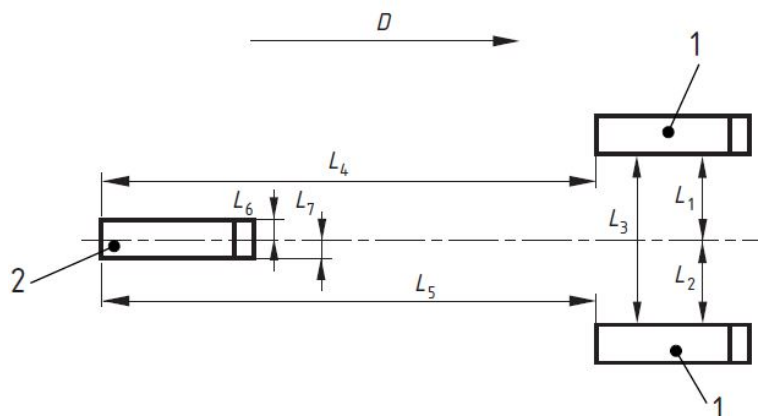
Слика 4.9 Склоп клизача [41]

На Слика 4.9 види се облик и димензије клизача (од гуме).

Величине са Слика 4.9 су:

$L_1=37,5\pm 2,5\text{mm}$, $L_2=10\pm 0,5\text{mm}$, $L_3=2-6\text{mm}$ и $\alpha=35\pm 5^\circ$

На Слика 4.10 приказан је распоред клизача од гуме.



Слика 4.10 Распоред клизача од гуме [41]

Величине са Слика 4.10 су:

$$L_3=46\pm 2\text{mm}, L_4=130\pm 3\text{mm}$$

Припрема узорка подлоге врши се тако да може да се постави како у правцу израде (машински правац), тако и у попречном правцу, димензија приближно 100cm×50cm. Ако је познато, потребно је обележити машински правац на узорку. Склоп панела и плочице поставља се тако да омогући мерење у оба правца — машинском и попречном-правцу.

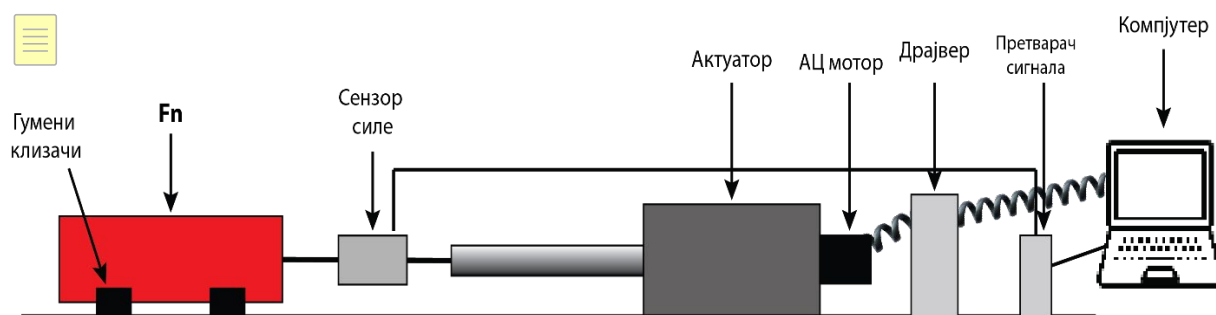
Узорци се припремају најмање 24 сата у стандардној атмосфери од $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и $(50 \pm 5)\%$ релативне влажности, или алтернативно на $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и $(65 \pm 5)\%$ релативне влажности. Површина узорака ламинатних и отпорних подних облога чисти се чистом сувом памучном крпом, а четком површина текстилних подних облога. Не користе се никаква средства за чишћење.

Припрема клизача врши се брусним папиром гранулације 60 како би се обезбедила уједначена дебљина, а затим се чисте и равномерно брусе површине клизача пре тестирања користећи брусни папир гранулације 320. Током равномерног брушења, брусни папир треба да буде у контакту са сва три клизача. Абразивни покрети треба да буду равномерни, напред-назад у дужинском правцу клизача, с тим да последња два потеза иду у супротном смеру од кретања клизача. Затим се уклања прашина са клизача. Понавља се припрема за сваки нови сет од 5 мерења.

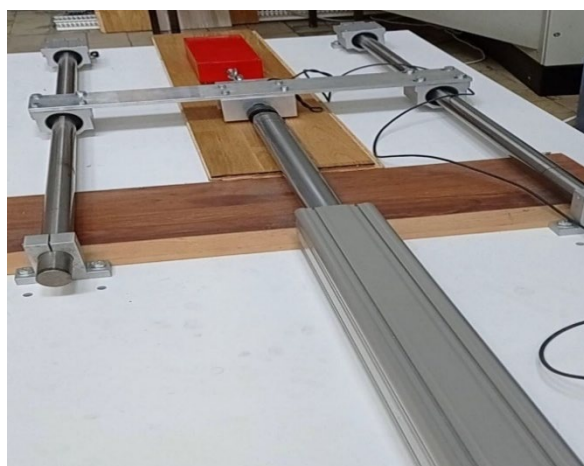
Мерења се врше у машинском правцу и попречном правцу. Ако правци нису познати, мерења се врше у правцу најнижег динамичког трења, провереног кроз довољан

број претходних тестова. Врше се пет мерења користећи тест уређај. За свако мерење користе се нове стазе. Прва два мерења могу бити нерепрезентативна и треба их занемарити. Бележе се хоризонталне силе (силе трења) дуж 0,30 m за треће, четврто и пето мерење за сваки правац [41].

За експериментално одређивање коефицијента трења (COF), развијен је уређај шематски приказан на Слика 4.11 (мерно место), користећи метод вучне силе. Метод вучне силе је један од најчешћих метода тестирања COF и одабран је за овај уређај. На Слика 4.12 приказано мерно место за одређивање коефицијента трења.



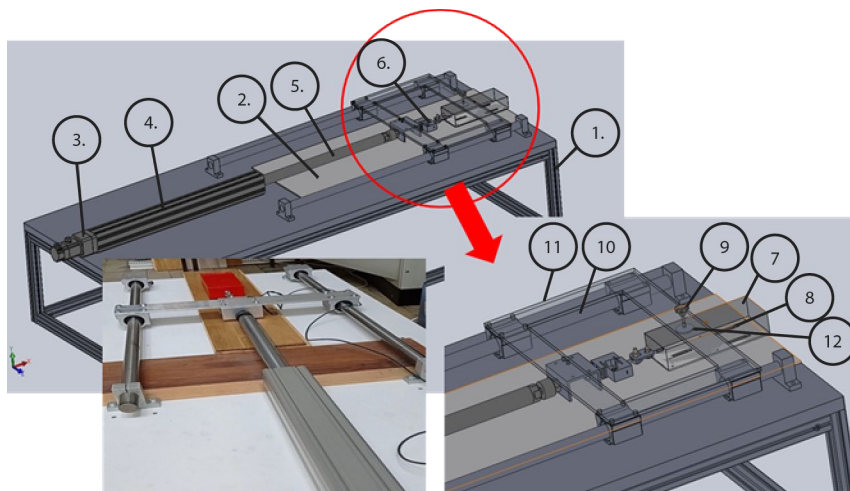
Слика 4.11 Шематски приказ мерног места за одређивање коефицијента трења



Слика 4.12 Мерно место (Трибометар) за одређивање коефицијента трења

Конструисани уређај обезбеђује широк спектар брзина, различите услове површине (сува, мокра, подмазана), тестирање различитих материјала, могућност промене и контроле нормалне силе, и тестирање са константном брзином. Уређај се састоји од носача за гумене клизаче, који такође делује својом тежином која дефинише нормалну силу, сензора силе, електричног линеарног актуатора са серво погоном, и

основе на коју се постављају различити узорци пода. Сам уређај је заснован на мерењу коефицијента трења према методу из стандарда EN 13892:2007. Електрични актуатор (SMC) је типа навојно вретено са куглицама, са АЦ серво мотором (Mitsubishi) уграђеним линијски.

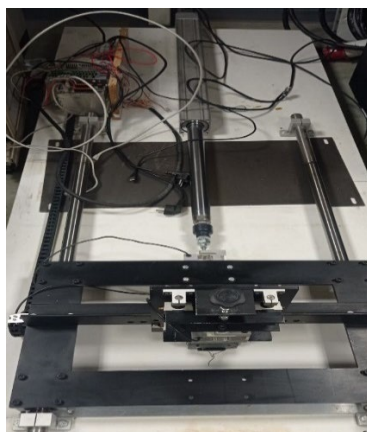


Слика 4.13 3D модел трибометра

3D модел трибометра са главним елементима представљен је на Слика 4.13. Сви елементи трибометра су на столу (2) са рамом (1). Електрични актуатор (4) са АЦ серво мотором (3) и клипом (5) вуче клизач (7) са узорцима гумених клизача за тестирање (8). Позиција (6) је сензор силе који мери силу трења. Сензор силе је произвођача НВМ (тип S2) и може мерити силу до 200N. Сензор силе и клизач су повезани крајевима шипки.

Уређај може достићи максималну брзину тестирања до 400mm/s и може радити са врло ниском брзином од 0,2mm/s. Уређај може достићи брзину тестирања за 0,1s, док је максимални ход уређаја 600mm и омогућава мерење коефицијента трења кроз дужину од 300-400 mm. Остатак хода (200-300 mm) је за убрзавање и успоравање клизача до жељене брзине тестирања. Максимално оптерећење које линеарни актуатор може издржати је 200N.

На Слика 4.14 приказан је уређај за одређивање коефицијента трења на којем је могуће мењати нормалну силу (оптерећење) приликом тестирања.



Слика 4.14 Трибометар са уређајем за промену нормалне силе

Узорци за тестирање се притискају тежином клизача (маса клизача је 10 kg). Клизач са узорцима монтираним на доњој страни клизи по узорку пода. Могући узорци пода су ламинат, винил, паркет, керамичке плочице итд. може променити нормалну силу која делује на клизач. Линеарни лежај и вођице онемогућавају ротацију и извијање актуатора и омогућавају прецизно линеарно кретање.

Управљање АЦ серво мотором врши се помоћу драјвера типа LECSA2-S4. Драјвер је са пулсним улазом који има до 7 тачака позиционирања. Контролни енкодер је инкрементални 17 битни са резолуцијом од 131072 пулса по обртају. Драјвер има 6 паралелна улаза и 4 излаза. Компјутер са софтвером за управљање и програмирање рада мотора је повезан са драјвером каблом LEC-MR-J3USB. Напајање драјвера је једносмерном струјом од 24 V, док мотор ради са наизменичном струјом напона 230 V. Драјвер има опцију повезивања са PLC-ом за сложеније операције са мотором. У експерименту извршеном за потребе дисертације коришћен је само драјвер. Софтвер за управљање је LEC-MRC 2E који се инсталира на компјутеру. Задавање команди у овом експерименту заснивало се на моду позиционирања који се налази у самом софтверу. Параметри који се уносе су: број обртаја мотора у минути чиме се дефинише брзина кретања (нпр, 1800 обртаја за брзину кретања од 300mm/s), време убрзања и успорења у ms (до максималне брзине односно до заустављања) и дистанце која се прелази (један импулс даје кретање од једног μm).

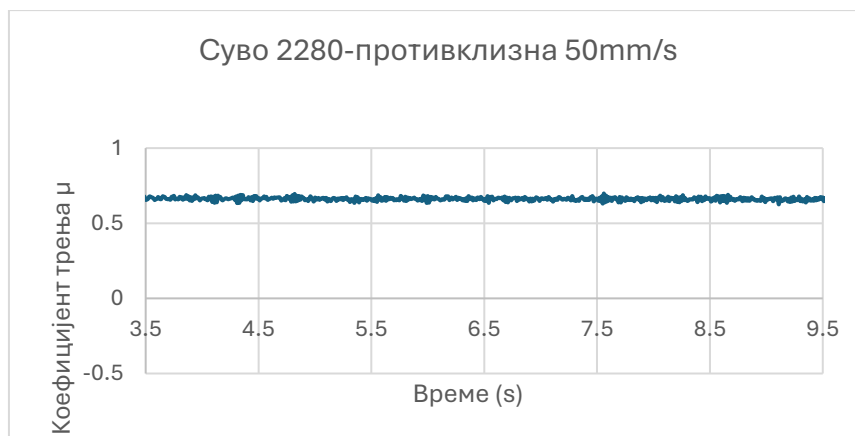
4.4.1 Анализа експерименталних резултата

Три гумена клизача (узорка) су причвршћена за носач. Клизачи за тестирање су направљени од гуме која је тестирана на хистерезис. Гумени клизачи су исечени од гумених плоча са димензијама 40x10x5mm сваки, у складу са стандардом EN 13893. Гумени узорци су равни, без текстуре. Нормална сила је 100N, што одговара контактном притиску од 83kPa. Површинска храпавост плоча је измерена уређајем Mitutoyo SurfTest SJ-301. Услови тестирања су били суви, мокри (присуство воде) и прекривени сапунским раствором, а брзина клизања је била 50mm/s и 300mm/s.

Поступак одређивања коефицијента трења се састоји из следећих корака:

- Актуатор се помоћу управљања преко рачунара доводи у крајњи (избачени) положај
- Постављају се гумени клизачи (3 комада) на доњој страни тега (нормалног оптерећења)
- Затим се врши повлачење тега са клизачима помоћу актуатора са задатом брзином (50mm/s и 300mm/s) и ходом од 600mm.
- На рачунару се врши снимање података о хоризонталној сили (сила трења) која се јавља између гумених клизача и гранитних плоча, као и време трајања повлачења
- На основу снимљених података прерачунавањем се одређује коефицијент трења као количник вучне и нормалне силе
- Укупан експерименталних проба је 296 (кинетички и статички)

На Слика 4.15 и Слика 4.16 приказани су дијаграми коефицијента трења за различите смеше гуме и различите брзине клизања.



Слика 4.15 Дијаграм коефицијента трења



Слика 4.16 Дијаграм коефицијента трења

Подаци о мерењу за површину противклизне плоче су представљени у Табела 4.5

Табела 4.5 Коефицијент трења по противклизној плочи

Триболошки пар	Стање подлоге	Тврдоћа (Sh)	Хистерезис	COF @50 mm/s	COF @300 mm/s
Гума OB221 / Противклизна плоча	суво	65	0,24	1,20	1,35
Гума OB221 / Противклизна плоча	влажно	65	0,24	0,65	0,60
Гума OB221 / Противклизна плоча	сапуница	65	0,24	0,50	0,52
Гума OB202 / Противклизна плоча	суво	65	0,35	0,56	0,67

Гума OB202 / Противклизна плоча	влажно	65	0,35	0,64	0,60
Гума OB202 / Противклизна плоча	сапуница	65	0,35	0,50	0,50
Гума OB2280 / Противклизна плоча	суво	65	0,39	0,65	0,76
Гума OB2280 / Противклизна плоча	влажно	65	0,39	0,74	0,70
Гума OB2280 / Противклизна плоча	сапуница	65	0,39	0,68	0,55
Гума OB290 / Противклизна плоча	суво	60	0,45	0,70	0,70
Гума OB290 / Противклизна плоча	влажно	60	0,45	0,65	0,60
Гума OB290 / Противклизна плоча	сапуница	60	0,45	0,45	0,50

Гума OB2280 са тврдоћом од 65Sh и хистерезисом гуме од 0,46 има већи коефицијент трења (COF) у условима мокре површине и сапунског раствора при брзинама од 50mm/s и 300mm/s. Вредности коефицијента трења су 0,74 и 0,70 респективно за брзину тестирања од 50mm/s и 300mm/s на мокрој површини, док гума OB221 са истом тврдоћом и нижим хистерезисом има 0,65 и 0,60 коефицијент трења за брзину тестирања од 50mm/s и 300mm/s.

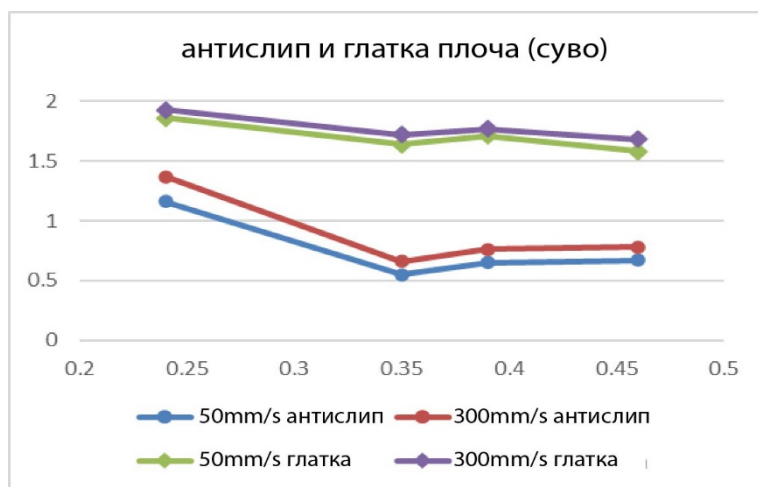
Подаци о мерењу на глаткој плочи су представљени у Табела 4.6

Табела 4.6 Коефицијент трења на глаткој плочи

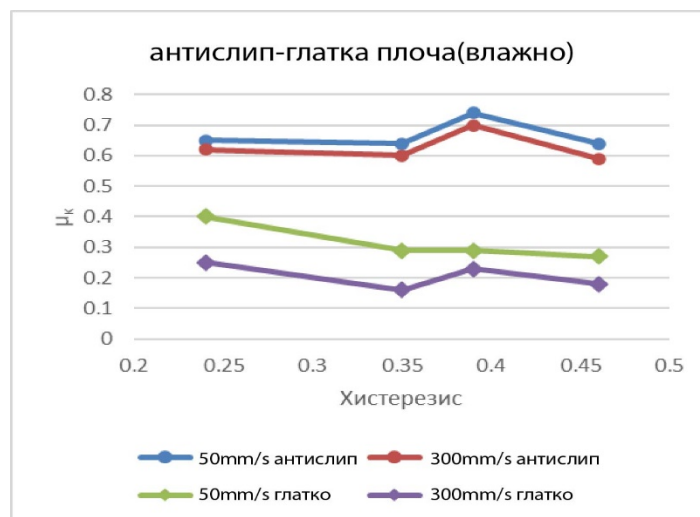
Триболошки пар	Стање подлоге	Тврдоћа (Sh)	Хистерезис	COF @50m m/s	COF @300 mm/s
Гума OB221 /Глатка плоча	суво	65	0,24	1,82	1,90
Гума OB221 /Глатка плоча	влажно	65	0,24	0,38	0,25
Гума OB221 / Глатка плоча	сапуница	65	0,24	0,24	0,26
Гума OB202 /Глатка плоча	суво	65	0,35	1,6	1,70

Гума OB202 /Глатка плоча	влажно	65	0,35	0,30	0,20
Гума OB202 /Глатка плоча	сапуни ца	65	0,35	0,10	0,15
Гума OB2280 /Глатка плоча	суво	65	0,39	1,71	1,77
Гума OB2280 /Глатка плоча	влажно	65	0,39	0,29	0,23
Гума OB2280 /Глатка плоча	сапуни ца	65	0,39	0,26	0,18
Гума OB290 /Глатка плоча	суво	60	0,45	1,60	1,70
Гума OB290 /Глатка плоча	влажно	60	0,45	0,26	0,20
Гума OB290 /Глатка плоча	сапуни ца	60	0,45	0,13	0,14

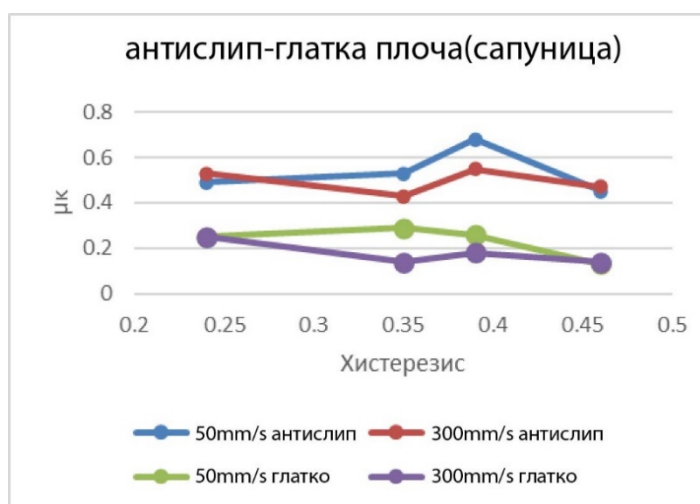
Гума OB221 има највише вредности коефицијента трења (COF), 1,82 и 1,90 при брзинама од 50mm/s и 300mm/s на глаткој плочи у сувим условима. Најниже вредности има гума OB290 у условима сапуном прекривене површине, 0,14 за брзину од 300mm/s и гума OB202, 0,10 при брзини од 50mm/s у условима сапуном прекривене површине.



Слика 4.17 Коефицијент трења између гуме и противклизне тј. глатке плоче у зависности од хистерезиса гуме на сувом



Слика 4.18 Коефицијент трења између гуме и противклизне тј. глатке плоче у зависности од хистерезиса гуме на влажном



Слика 4.19 Коефицијент трења између гуме и противклизне тј. глатке плоче у зависности од хистерезиса гуме на сапуници

Највећа вредност коефицијента трења (1,6-1,9) је добијена на глатким плочама у условима сувог контакта, док је најмања (0,1-0,26) добијена на глатким плочама у условима контакта са сапуном. У случају противклизних плоча, највећа вредност коефицијента трења (0,56-1,35) је постигнута у условима сувог контакта, а најмањи коефицијент трења (0,45-0,68) је постигнут у условима контакта са сапуном.

Слика 4.19 приказује однос између коефицијента трења и хистерезиса гуме, као и брзине кретања од 50mm/s и 300mm/s. Слика 4.19 такође приказује вредности коефицијента трења за случај клизања на глаткој плочи, где су вредности коефицијента трења веома високе за суве услове, што указује на то да је адхезивна компонента трења доминантна и

да има веома високу вредност. Са присуством влаге и сапуна, коефицијент трења драстично опада за глатку површину.

На основу експерименталних резултата може се закључити да код тестираних вискоеластичних материјала, у условима присуства супстанци које смањују трење (влага, сапунски раствор), долази до значајног смањења коефицијента трења.

Услови контакта под којима су извршена мерења су суви, мокри и са сапуном. Може се уочити тренд повећања коефицијента трења са повећањем хистерезиса гуме, док промена брзине од 50 mm/s до 300 mm/s не утиче значајно на вредност коефицијента трења. Такође, постоји уочљива разлика у вредностима коефицијента трења између глатких и противклизних плоча под истим условима, што указује на утицај храпавости подлоге као и хистерезиса гуме. Ниже вредности коефицијента трења су утврђене за услове са сапуном, док су више вредности добијене за влажне услове подлоге.

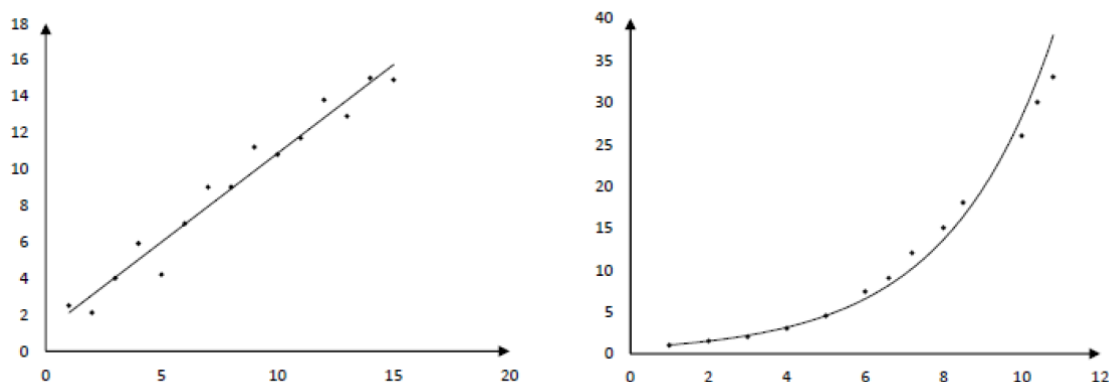
Слика 4.17, Слика 4.18 и Слика 4.19 и Табела 4.5 показују да је утицај хистерезиса на COF (коефицијент трења) за суве услове подлоге са противклизним плочама занемарљив. Највиши коефицијент трења се примећује код гуме са најнижим хистерезисом и тврдоћом од 65Sh или 60Sh. Вредности коефицијента трења за ове услове крећу се од 1,2 до 1,35 при брзинама од 50 mm/s и 300 mm/s. Међутим, када се у контакт уведу вода и сапун, коефицијент трења драстично пада на вредности од 0,65 и 0,60 за брзине од 50 mm/s и 300 mm/s, респективно, код гуме са најнижим хистерезисом. Насупрот сувим условима подлоге, у овом случају, повећање хистерезиса доводи до повећања коефицијента трења за исту тврдоћу, док се за највиши хистерезис и тврдоћу од 60Sh коефицијент трења смањује. Сличан тренд се примећује и за подлогу са присуством сапуна, али са нижим вредностима коефицијента трења. Утицај хистерезиса гуме је занемарљив за суве услове подлоге, али постаје уочљив када је присутна влажност у облику сапуна. Хистерезис гуме има значајан утицај на коефицијент трења у влажним условима при високим брзинама, што одговара условима ходања људи и треба узети у обзир приликом производње ђонова ципела. Ако је хистерезис гуме познат (тестиран), лакше је предвидети какав ће бити коефицијент трења у неким условима (влажним, храпавим површинама, високом брзином). На глаткој плочи нема значајног утицаја хистерезиса гуме на коефицијент трења. У поређењу са коефицијентом трења на противклизним плочама, коефицијент трења на глаткој плочи је већи у сувим условима због утицаја адхезије (адхезивна компонента трења је доминантна), док је на

противклизним плочама коефицијент трења већи у влажним условима и са сапунским раствором због утицаја хистерезисног трења.

5. Регресиона анализа

Регресионе анализе су скуп статистичких метода које се користе за одређивање веза између зависне променљиве и једне или више независних променљивих. Физичке величине могу бити корелисане и некорелисана (зависне и независне). Независне су оне физичке величине код којих на основу познавања једне не можемо закључити ништа о другој. Пример би биле године и телесна маса човека. Зависне су величине код којих једна тачно одређује другу или је ограничава. За то би важио пример: на основу температуре гаса, при константној запремини, можемо одредити притисак који влада у посуди у којој се гас налази. Регресиона анализа може се користити за процену односа између променљивих и за предвиђање будућег односа између њих. Регресиона анализа показује како се зависна променљива мења са променом независне променљиве и колики утицај има на њу. Регресиона анализа се заснива на збиру квадрата, помоћу којих се одређује расипање тачака. Циљ анализе је да се добије што мањи збир квадрата и линија која најмање одступа од података.

Регресионе анализе укључују више варијација као што су: линеарна, вишеструка линеарна и нелинеарна регресија. Најчешће у употреби су проста линеарна и вишеструка линеарна регресија. Нелинеарна регресиона анализа се користи за компликованије податке где зависне и независне променљиве показују нелинеарну везу [70]. На Слика 5.1 приказан је пример линеарне и нелинеарне зависности променљивих.



Слика 5.1 Пример линеарне и нелинеарне зависности променљивих

Постоје детерминистички и статистички регресиони модел. Код детерминистичког модела важи израз:

$$Y = a + bX \quad 5.1$$

Овај модел описује тачну зависност променљивих X и Y , односно доказује како је променљива Y одређена тачно једном променљивом X .

Статистички модел може се написати изразом:

$$Y = a + bX + \epsilon \quad 5.2$$

где ϵ показује разлику између експериментално измерених или утврђених вредности променљиве величине и теоријског предвиђања вредности те променљиве величине.

Регресионе анализе се користе у више различитих дисциплина: најчешће у економији, психологији, пољопривреди, политици, машинском учењу итд.

Линеарна регресиона анализа се заснива на шест основних претпоставки:

1. Зависне и независне променљиве показују линеарни однос између нагиба и пресека.
2. Независна променљива није случајна.
3. Вредност остатка (грешке) је нула.
4. Вредност остатка (грешке) је константна за сва посматрања.
5. Вредности остатка (грешке) нису повезане за сва посматрања.
6. Вредност остатка (грешке) је са нормалном расподелом.

5.1.1 Проста (једнострука) регресиона анализа

Проста регресиона анализа је модел који оцењује везу између независне променљиве и зависне променљиве. У том случају имамо више независно променљивих, а само једна се мења. Проста регресиона анализа се изражава помоћу следеће формуле:

$$Y = a + bX + \epsilon \quad 5.3$$

Где су:

Y - зависна променљива (променљива одговора),

X - независна променљива (објашњавајуће променљиве),

a - пресек, очекивана средња вредност зависне променљиве када би све независне променљиве имале вредност нула, на дијаграму место где линија сече у осу,

b - нагиб регресионе линије, представља у ком односу се мења y са променом x и

ϵ - грешка (резидуал), разлика стварне вредности зависне променљиве и предвиђене вредности [70].

5.1.2 Вишеструка регресиона анализа

Вишеструка регресиона анализа је у основи иста као и проста, разлика је у примени више независних променљивих. Једначина за вишеструку регресиону анализу може се написати као:

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + \epsilon \quad 5.4$$

Где су: Y - зависна променљива, X_1, X_2, X_3 - независне променљиве, a - пресек, b, c, d - нагиб и ϵ - грешка.

Вишеструка регресиона анализа има исте претпоставке као и проста регресиона анализа. Обзиром да код вишеструке регресионе анализе постоје више независних променљивих, уводи се још један услов: неколинеарност- независне променљиве треба да буду минимално повезане, у случају више повезаности тешко је утврдити праву зависност зависне и независних променљивих [70].

Вишеструка регресиона анализа налази примену у трибологији. Један од радова који приказује и описује примену вишеструке регресионе анализе на предвиђање коефицијента трења између пода и различитих ђонова у присуству уља репице [50]. У том раду су независне променљиве: тврдоћа материјала, површина газећег слоја, ширина пете, фактор облика пете, врста пода. Укупан значај модела је тестиран коришћењем ANOVA метода вишеструке регресионе анализе. Тестирање индивидуалних регресионих коефицијената вршено је t - тестом. Метода елиминације уназад је коришћења за утврђивање утицајних коефицијената [50].

У овој дисертацији описан је пример примене вишеструке регресионе анализе за податке добијене приликом мерења кинетичког коефицијента трења између различитих узорака гуме за израду ђонова ципела и подова под различитим условима. Коришћен је метод елиминације који је резултирао укључивањем параметара храпавости површине и врсте подлоге. Задатак примене регресионе анализе је утврђивање међусобне зависности параметара и њихов утицај на коефицијент трења између узорака ђона и подлоге. За подове су коришћени узорци од гранита, керамика, за које је измерена и средња аритметичка храпавост (Ra). Као узорци гуме коришћени су исечци ђонова ципела тврдоћа 60Sh и 65Sh. Софтвер за обраду података и примену регресионе методе је Microsoft Excel. Поред метода елиминације користе се и метод селекције унапред (додавање параметара један по један са најмањим вредностима p статистике) и мешовити метод (комбинација метода елиминације и селекције).

Користећи регресиону анализу на постојећим улазним и излазним подацима, добија се следећа једначина:

$$\mu_k = 1,899 - 0,686 \text{ histerezis} + 0,000012 \text{ tvrdoća} - 0,018 \text{ hrapavost} + 0,0000318 \text{ brzina} - 0,459 \text{ stanje podloge} \quad 5.5$$

Табела 5.1 показује резултате анализе података свих мерења (за све услове подлоге) помоћу регресионе анализе.

Табела 5.1 Регресиона анализа податка свих мерења

Регресиона статистика					
вишеструки коефицијент R	0,72887699				
R квадрат	0,53126167				
прилагођени коефицијент R квадрат	0,5210717				
стандардна грешка	0.36552018				
посматрања	236				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>значајност F</i>
Регресија	5	34,828	6,9656	52.13578	5,3E-36
Остатак	230	30,72915	0,133605		
Укупно	235	65,55715			
	<i>коефицијенти</i>	<i>станд. грешка</i>	<i>t стат.</i>	<i>P- вредност</i>	
константа	1,89992498	1,18297	1,606064	0,109632	
хистерезис	-0,6865623	0,468378	-1,46583	0,144061	
тврдоћа	1,2069E-05	0,01646	0,000733	0,999416	
храпавост	-0,0182225	0,010626	-1,71485	0,08772	
брзина	3,1864E-05	0,00019	0,167402	0,867201	
стање подлоге	-0,4594375	0,028897	-15,8992	6,71E-39	

R вредност је коефицијент вишеструке корелације и показује колико је модел добар у предвиђању зависне променљиве. У овом случају, вредност R је 0,73, што указује на високу способност предвиђања. R -квадрат вредност има вредност 0,53 (или 53%) и показује да независне променљиве објашњавају значајан део варијације зависне променљиве, што значи да постоји јака веза (корелација) између њих. Параметар који показује да ли је модел регресије прихватљив је Significance F (значајност F) и треба да буде мањи 0,05. Како је у описаном случају вредност значајност F мањи од 0,05, закључује се да је модел регресије у реду. Вредност F у табели показује да је регресиони модел добар и да независне променљиве добро предвиђају зависну променљиву. Поред коефицијената независно променљивих и стандардне грешке виде се и вредности статистике t и p . На основу t теста можемо одлучити да ли је x користан (линеарни) предиктор за y . P -вредност у регресионом моделу мери јачину доказа против нулте хипотезе, указујући на то да ли су посматрани подаци могли настати случајно. Ниска p -вредност ($<0,05$) сугерише да је коефицијент статистички значајан, што подразумева смислену везу између променљиве и одговора. Како су вредности статистике p за независне променљиве тврдоће гуме и брзине и стања површине велике (веће од 0,05), исте елиминишемо у наредним корацима. Ове вредности нам показују и да су наведене независне променљиве са малим утицајем на зависну променљиву.

Величине у табелама за регресију су:

- df је број степени слободе повезаних са изворима варијансе.
- SS је збир квадрата. Што је мањи резидуални SS у поређењу са укупним SS , то модел боље одговара подацима.
- MS је средњи квадрат.
- F је F статистика, или F -тест за нулту хипотезу. Користи се за тестирање укупне значајности модела.
- Significance F је P -вредност F теста.

Вредност значајности F даје представу о томе колико су резултати поуздани (статистички значајни). Ако је значајност F мањи од 0,05 (5%), модел је добар. Ако је већи од 0,05, требало изабрати другу независну променљиву.

У табели са коефицијентима могу се видети вредности t -статистике и p -вредности. Из табеле се може закључити да само коефицијент за стање подлоге има p -вредност мању од 0,05, што указује да је ова променљива најзначајнија.

Табела 5.2 Корелација улазних променљивих са регресионим методом

	кинетички μ	хистерезис гуме	тврдоћа	храпавост	брзина
кинетички μ	1				
хистерезис	-0,10018	1			
тврдоћа	0,073795	-0,74763	1		
храпавост	-0,07805	0,006196	0,009898	1	
брзина	0,007557	3,74E-18	3,54E-18	-1,7E-18	1

Табела 5.2 приказује корелацију променљивих у регресионом моделу. Највећа корелација међу променљивим је између хистерезиса гуме и тврдоће гуме. Код осталих променљивих не постоје значајне вредности корелације. У регресионој анализи, метод елиминације открива да су најзначајније променљиве које утичу на коефицијент трења (COF) храпавост, хистерезис гуме и стање подлоге.

Табела 5.3 Регресиони подаци за противклизну плочу (влажно, сапуница)

Регресиона статистика					
вишеструки коефицијент R	0,880958				
R квадрат	0,776087				
прилагођени коефицијент квадрат	0,764145				
стандардна грешка	0,043438				
посматрања	80				
	df	SS	MS	F	значајност F
Регресија	4	0,490486	0,122622	64,98802	1,28E-23
Остатак	75	0,141513	0,001887		
Укупно	79	0,631999			

	коэффициенти	станд. грешка	t стат.	P- вредност
константа	-0,8275	0,241086	-3,43238	0,000977
хистерезис	0,5	0,095243	5,249705	1,37E-06
тврдоћа	0,0249	0,003341	7,452363	1,31E-10
храпавост	-0,00013	3,89E-05	-3,21735	0,001911
брзина	-0,13525	0,009713	-13,9247	1,73E-22

Табела 5.3 показује да су најутицајнији параметри на COF (коэффициент трења) за анти-клизне плочице (мокре и сапуњаве) хистерезис гуме и стање подлоге. Хистерезис гуме има позитиван знак, што показује да се са порастом хистерезиса, коэффициент трења повећава. Сви предиктори су значајни, *p*-вредности су мање од 0,05. Коэффициенти добијени из ове регресије указују на следеће: како је коэффициент хистерезиса гуме 0,5 са позитивним знаком, коэффициент трења се повећава (узимајући у обзир само влажне и сапуњаве површине, при свим брзинама на анти-клизним плочицама). Тврдоћа гуме има коэффициент од 0,0249, што указује да повећање тврдоће благо повећава коэффициент трења. Стање подлоге има негативан утицај на коэффициент трења. Најзначајнији параметар је стање подлоге са *p*-вредношћу $1,73 \times 10^{-22}$, тврдоћа гуме са *p*-вредношћу $1,31 \times 10^{-10}$ и хистерезис са *p*-вредношћу $1,37 \times 10^{-6}$.

Табела 5.4 Регресиони подаци за глатку плочу (влажно, сапуница)

Регресиона статистика					
вишеструки коэффициент R	0,788303				
R квадрат	0,621422				
прилагођени коэффициент R квадрат	0,600094				
стандардна грешка	0,04788				
посматрања	76				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	значајност <i>F</i>
Регресија	4	0,267175	0,066794	29,13597	2,44E-14
Остатак	71	0,162767	0,002292		
Укупно	75	0,429942			

	<i>коэффициенти</i>	<i>станд. грешка</i>	<i>t стат.</i>	<i>P- вредност</i>
константа	0,600628	0,276521	2,172091	0,03319
хистерезис	-0,45165	0,109357	-4,1301	9,76E-05
тврдоћа	0,000105	0,003858	0,027102	0,978454
храпавост	-0,00024	4,39E-05	-5,46229	6,57E-07
брзина	-0,07286	0,01103	-6,60523	6,17E-09

Табела 5.4 показује да су најутицајнији параметри на коефицијент трења за глатке плочице (влажне и сапуњаве) хистерезис гуме и стање подлоге. Хистерезис гуме, брзина и стање подлоге имају негативне знакове, што показује да се са њиховим повећањем коефицијент трења смањује. Тврдоћа има позитиван знак коефицијента, и са повећањем тврдоће коефицијент трења се повећава. Сви предиктори су значајни са p -вредношћу мањом од 0,5, осим тврдоће гуме чија је p -вредност 0,978.

Резултати регресионе анализе се не подударају са експерименталним подацима, показујући да регресија није адекватна за анализу ових експерименталних резултата. Ово неслагање је настало зато што регресија претпоставља линеарну везу између улазних и излазних параметара, што не важи у овом специфичном случају трења гуме. Међутим, регресиона анализа је јасно указала да хистерезис гуме значајно утиче на коефицијент трења између гуме и плоча.

6. Резултати анализе помоћу Тагучи метода

Тагучи метода представља приступ у инжењерству и управљању квалитетом који је развио јапански статистичар и инжењер Геничи Тагучи. Ова метода је стекла значајан углед у индустрији захваљујући својој способности да побољша квалитет и стабилност производа и процеса, а да притом минимизује трошкове и време потребно за експериментисање. За разлику од класичних метода оптимизације, Тагучи метод фокусира се на умањење варијабилности резултата и пружа детаљан, структуриран начин за идентификацију критичних фактора који утичу на стабилност и перформансе процеса.

Суштина Тагучи методе лежи у статистичком дизајну експеримената (DOE) који користи ортогоналне матрице за истраживање утицаја више улазних фактора на излазе система. Уместо тестирања сваке могуће комбинације фактора, Тагучи метода користи пажљиво одабране комбинације које омогућавају добијање значајних информација са минималним бројем експеримената. Овај приступ смањује трошкове и време потребно за експериментисање, омогућавајући инжењерима да прецизније и ефикасније оптимизују параметре процеса.

Један од основних концепата Тагучи методе је сигнал-шум однос (S/N однос), који представља меру квалитета производа или процеса. У зависности од природе жељених резултата, примењују се три типа S/N односа: „веће је боље“, „мање је боље“ и „номинално је боље“. Овај однос помаже у идентификацији најбољих подешавања улазних параметара, при чему „сигнал“ представља жељене резултате, а „шум“ нежељене варијације у резултатима. На овај начин, S/N однос омогућава редукцију варијабилности процеса и побољшање стабилности резултата.

Тагучи метода такође укључује анализу варијансе (ANOVA), која омогућава детаљно квантитативно тумачење доприноса сваког фактора укупној варијанси резултата. ANOVA анализа одређује колики део варијансе у излазним подацима може бити објашњен променом појединачних фактора, што омогућава инжењерима да прецизно идентификују критичне факторе. Овом анализом могуће је рангирати факторе и идентификовати који од њих највише утичу на варијабилност излаза, што је основа за доношење одлука о побољшању процеса.

Тагучи методологија прати структуриран низ корака који омогућавају ефикасну оптимизацију процеса:

1. Идентификација фактора и њихових нивоа — први корак подразумева одабир фактора који би могли да утичу на излаз процеса и дефинисање нивоа за сваки фактор.
2. Избор ортогоналне матрице — следи избор одговарајуће ортогоналне матрице која минимизира број експеримената, а притом омогућава поуздано испитивање свих фактора.
3. Спровођење експеримената — врши се спровођење експеримената према одабраној матрици.
4. Израчунавање S/N односа — анализом S/N односа за сваки експеримент добија се увид у варијабилност и стабилност излазних резултата.
5. ANOVA анализа — омогућава одређивање значаја сваког фактора и утицаја на варијабилност излаза.
6. Потврдни експеримент — као последњи корак, спроводи се потврдни експеримент ради верификације резултата и оптималних подешавања параметара.

Једна од кључних предности Тагучи методе је њена ефикасност у минимизирању експеримената и смањењу трошкова, што је од посебног значаја у инжењерским и производним индустријама. Тагучи метода омогућава брзу идентификацију најбољих подешавања процеса и побољшава квалитет производа, смањујући варијабилност и повећавајући стабилност резултата. Међутим, ограничења методе укључују зависност од линеарних односа између фактора и сложеност примене у веома великим системима, где је интеракција између фактора сложенија.

Примена Тагучи методе у анализи коефицијента трења омогућава идентификацију најзначајнијих фактора који утичу на трење и његову варијабилност, као и одређивање оптималних услова за смањење или контролу овог параметра. Коефицијент трења игра кључну улогу у различитим индустријским процесима, од машинске обраде до ауто-индустрије, где стабилност трења директно утиче на квалитет и поузданост производа.

У првој фази дефинишу се сви релевантни фактори који могу утицати на коефицијент трења, као што су:

- Материјал површине: различите врсте материјала имају различите карактеристике трења.
- Сила притиска: повећање или смањење притиска између две површине директно утиче на коефицијент трења.
- Брзина клизања: брзина којом се површине крећу једна преко друге може утицати на промене величине коефицијента трења.

- Температура: трење се често мења са температуром, па је овај параметар такође критичан.
- Подмазивање: присуство или одсуство подмазивања може значајно променити трење.

За сваки од ових фактора дефинишу се нивои, што значи конкретне вредности или услови (на пример, за материјал: челик, алуминијум и бронза; за притисак: 10, 20 и 30Pa).

Ортогонална матрица омогућава да се смањи број потребних експеримената, тако да се сваки фактор испита на различитим нивоима. Избор одговарајуће матрице зависи од броја фактора и њихових нивоа; на пример, ако постоји пет фактора са три нивоа, користиће се одговарајућа ортогонална матрица (нпр. L27) која минимизује број потребних експеримената.

Експерименти се изводе према изабраној матрици, где се за сваки експеримент бележи вредност коефицијента трења. На пример, за комбинацију челика са одређеним притиском, брзином клизања, температуром и нивоом подмазивања, мери се коефицијент трења.

Након прикупљања података из свих експеримената, израчунава се S/N однос. За анализу трења, може се користити "мање је боље" однос, с обзиром на то да је мањи коефицијент трења често пожељан. S/N однос помаже да се идентификују фактори који доприносе смањењу варијабилности и постизању нижег трења.

Применом ANOVA анализе могуће је прецизно утврдити утицај сваког фактора на варијабилност трења. Ова анализа одређује који фактори имају највећи утицај на коефицијент трења, што омогућава да се фокусирају ресурси на контролу тих параметара.

На крају, спроводи се потврдни експеримент са оптималним нивоима за сваки фактор, добијеним из претходних анализа. Овај корак служи за верификацију да су одабрани параметри заиста оптимални и да смањују коефицијент трења или стабилизују његову варијабилност.

Примена Тагучи методе у анализи коефицијента трења омогућава ефикасно и економично утврђивање најважнијих параметара који утичу на трење. На овај начин добијају се поуздани подаци за оптимизацију процеса који укључују трење, што доводи до повећања поузданости и квалитета производа.

Тагучи метода оптимизује квалитет производа применом статистичког дизајна параметара, истовремено минимизујући број експеримената у инжењерској индустрији.

У овој области, примарни циљ је доследно обезбеђивање високог квалитета производа, почев од почетних концепата и кроз све фазе пројектовања и инжењеринга [71].

Тагучи експериментални дизајн је статистичка техника која се користи за испитивање утицаја варијација улазних фактора на одговоре експеримента. Ова метода има за циљ да прецизно одреди оптимална подешавања процеса која смањују варијабилност излазних вредности. Приступ омогућава испитивање одабраних фактора уз минималан број експеримената, користећи ортогоналну матрицу [72] [73]. Уопштено, Тагучи методологија обухвата неколико критичних фаза: идентификацију фактора и њихових нивоа, извођење експеримената коришћењем табеле ортогоналне матрице, процену односа сигнал-шум (S/N), утврђивање табеле излаза и примену ANOVA анализе.

У Тагучи методи, S/N однос служи за мерење квалитетних карактеристика које одступају од жељених вредности. Овај однос представља однос средње вредности сигнала и стандардне девијације вредности шума и користи се за рангирање улазних фактора у процесу. Приликом анализе S/N односа примењују се три типа карактеристика квалитета: „веће је боље“ (6.1), „мање је боље“ (6.2) и „номинално је боље“ (6.3).

Избор одговарајуће карактеристике квалитета зависи од жељеног циља излаза.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad 6.1$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad 6.2$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 / S^2 \right) \quad 6.3$$

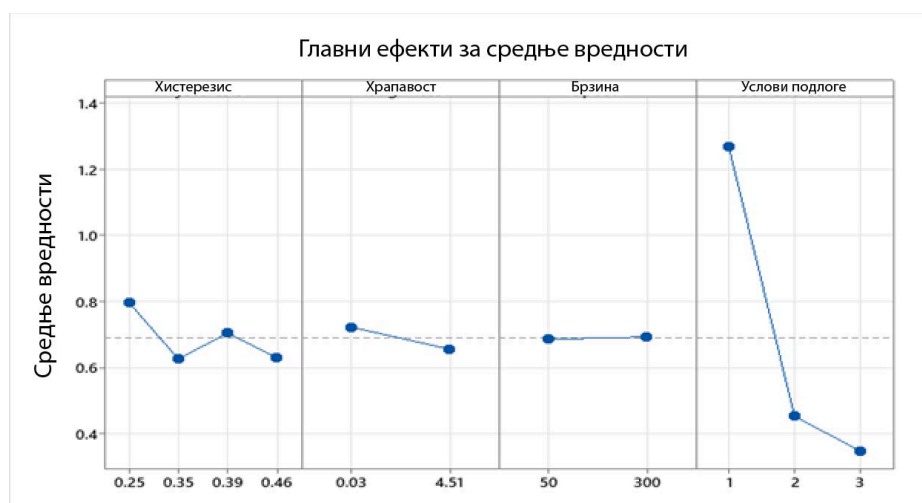
где су: y_i - i -та посматрана вредност излаза, n - број експеримената, y - просечна вредност излаза, S - одступање карактеристика од y односно варијанса.

Тагучи метода, уместо прилагођавања математичких модела подацима добијеним ортогоналном матрицом, примењује ANOVA анализу — статистичку методу која квантитативно процењује варијабилност података мерењем њихове варијансе. На овај начин одређује се који део укупне варијансе може бити објашњен променом подешавања различитих фактора. ANOVA анализа омогућава потврду значаја сваког фактора у смислу његовог доприноса резултатима [73] [71] [74] [75]. Завршна фаза укључује потврдни експеримент, који се изводи према процењеним вредностима параметара процеса у складу са датом једначином.

$$\hat{\eta}_{opt} = + \sum_{i=1}^p (\eta_{i,opt} - \eta) \quad 6.4$$

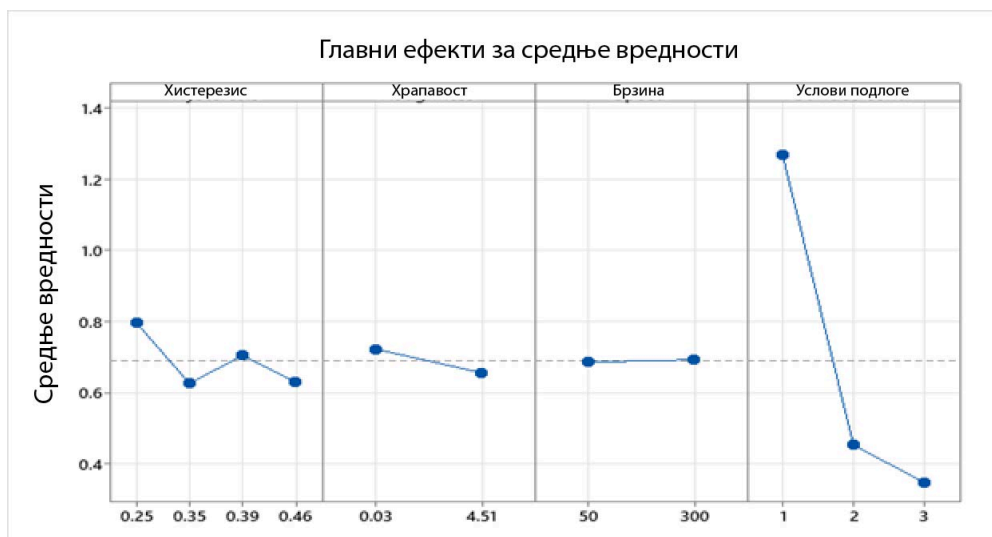
где су: η - средњи S/N однос, $\hat{\eta}_{i,opt}$ -средњи S/N однос за i -ти фактор оптималног нивоа и p -број фактора који значајно утичу на посматрану карактеристику квалитета.

Тагучи анализа коефицијента трења између гумених узорака и гранитних плоча спроведена је у неколико итерација. У првом дизајну Тагучи методе коришћени су сви параметри (променљиве), а анализа је показала да тврдоћа има јаку корелацију са осталим параметрима, па је искључена из даље анализе. У другој анализи коришћени параметри били су хистерезис, брзина, храпавост и услови подлоге. Дизајн Тагучи експеримента није ортогоналан.



Слика 6.1 Главни ефекти коефицијента трења (суво, влажно, сапуница)

На Слика 6.1 приказани су главни ефекти за коефицијент трења (COF) добијени Тагучи анализом. На дијаграму се може видети утицај параметара на коефицијент трења. Повећањем хистерезиса, коефицијент трења опада, као и са повећањем храпавости. Са повећањем брзине, коефицијент трења показује благо повећање, док се са променом стања подлоге (од суве до мокре и сапуњаве) коефицијент трења значајно смањује. У овој студији, коефицијент трења је оцењен користећи номинално најбољу карактеристику.



Слика 6.2 Главни ефекти коефицијента трења (влажно, сапуница)

На дијаграму на Слика 6.2 могу се видети главни ефекти коефицијента трења (COF) за мокре и сапуњаве услове. У овом случају, са повећањем храпавости, коефицијент трења се повећава, док са повећањем брзине, коефицијент трења опада.

Тагучи метода је укључена у анализу, пружајући резултате који су у већој сагласности са експерименталним подацима у поређењу са регресионом анализом. Према Тагучи методи, узимајући у обзир све параметре осим тврдоће гуме (Слика 6.1) показује висок степен корелације са осталим параметрима, коефицијент трења опада са повећањем хистерезиса. Исти ефекат се јавља са повећањем храпавости. Веће брзине повећавају коефицијент трења, док увођење влаге и сапуна на контактної површини доводи до смањења коефицијента.

На Слика 6.2 приказан је дијаграм анализе резултата за случај површине подмазане влагом и сапуном. У овом случају, повећање хистерезиса доприноси укупном смањењу коефицијента трења. Повећање храпавости доводи до повећања коефицијента трења, што је у сагласности са експерименталним резултатима, док повећање брзине доводи до смањења коефицијента трења. Такође, додавање сапуна на контактної површини резултира смањењем коефицијента трења.

Табела 6.1 Табела одговора за средње вредности (суво, влажно, сапуница)

Ниво	Хистерезис	Храпавост	Брзина	Стање подлоге
1	0,7970	0,7230	0,6863	1,2671
2	0,6267	0,6563	0,6931	0,4536
3	0,7048			0,3483
4	0,6302			
Делта	0,1703	0,0667	0,0068	0,9189
Ранг	2	3	4	1

Табела 6.1 приказује средње вредности одговора за различите услове подлоге, хистерезис гуме, храпавост и брзине, добијене методом Тагучи. Вредности делта користе се за одређивање рангирања ових фактора према њиховом утицају на коефицијент трења (COF). Анализа показује да је за све услове површине најзначајнији фактор који утиче на COF стање површине, затим следе хистерезис, храпавост и брзина.

Табела 6.2 Табела одговора за средње вредности (влажно, сапуница)

Ниво	Хистерезис	Храпавост	Брзина	Стање подлоге
1	0,4275	0,2208	0,4238	0,4536
2	0,3655	0,5811	0,3781	0,3483
3	0,4550			
4	0,3558			
Делта	0,0993	0,3604	0,0456	0,1054
Ранг	3	1	4	2

Табела 6.2 приказује табелу одговора за средње вредности у условима влажне и сапуњаве површине. У овим условима, храпавост и стање површине су најзначајнији параметри који утичу на коефицијент трења (COF), затим следе хистерезис гуме и брзина.

7. Предвиђање коефицијента трења применом неуронске мреже

7.1 Неуронске мреже

Неуронске мреже, инспирисане биолошким неуронским системима, представљају један од најзначајнијих приступа у области вештачке интелигенције (AI). Ове мреже су постале основни алат за решавање комплексних проблема у разним областима као што су препознавање образаца, природна обрада језика, и предиктивна аналитика.

Неуронске мреже су се први пут појавиле у средином 20. века. Први модел вештачког неурона предложили су Ворен МакКало и Волтер Питс 1943. године. Њихов модел је био инспирисан радом неурона у мозгу и базирао се на бинарним операцијама. Током 1950-их и 1960-их, истраживачи као што су Франк Розенблат развили су прве функционалне неуронске мреже, познате као перцептрони.

Неурони су основни градивни блокови неуронских мрежа. Сваки неурон прима више улазних сигнала, који се помноже тежинама и саберу. Резултат ове операције пролази кроз активациону функцију која одређује излаз неурона.

Активационе функције су кључне за функционалност неуронских мрежа. Оне уводе нелинеарност у систем, омогућавајући мрежи да решава комплексне проблеме. Најчешће коришћене активационе функције укључују Sigmoid, Tanh, и ReLU (Rectified Linear Unit).

Најпознатији алгоритам за учење неуронских мрежа је backpropagation (унутрашње ширење грешке). Овај алгоритам користи метод градијентног спуштања за минимизирање грешке између предвиђених и стварних вредности.

Постоје више врста неуронских мрежа:

- Фидфорвард Неуронске Мреже (FNN). Ово су најједноставније неуронске мреже где информација тече у једном смеру, од улаза ка излазу. Нема повратних веза.
- Конволуционе Неуронске Мреже (CNN). CNN су посебно ефикасне за обраду визуелних података. Користе конволуционе слојеве за екстракцију карактеристика из слика.
- Рекурентне Неуронске Мреже (RNN). RNN су дизајниране за обраду секвенцијалних података. Користе унутрашње повратне везе што им омогућава да задрже информације кроз време.

Неуронске мреже се широко користе у препознавању лица, рукописа и других образаца. CNN мреже су посебно погодне за ове задатке.

У области NLP, неуронске мреже се користе за задатке као што су машинско превођење, анализа сентимента и генерисање текста. RNN и трансформација архитектуре, као што је BERT, су кључне у овој области.

Неуронске мреже помажу у анализи медицинских слика и предикцији болести. На пример, CNN се користе за откривање тумора на рендгенским снимцима.

Неуронске мреже захтевају велике количине података за обуку. Недостатак података може довести до претренираности и слабих перформанси. Обучавање сложених неуронских мрежа захтева значајне рачунарске ресурсе. Графички процесори (GPU) и специјализовани хардвер као што су TPU се често користе за убрзање процеса обуке.

Неуронске мреже се често посматрају као "црне кутије" због њихове сложености и недостатка транспарентности. Ово отежава разумевање како и зашто мрежа доноси одређене одлуке.

AutoML је област која тежи аутоматизацији дизајна и обуке неуронских мрежа. Ово може омогућити бржи развој и примену неуронских мрежа у различитим доменима.

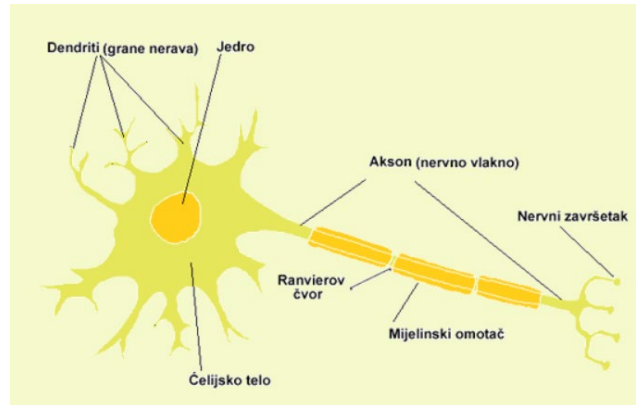
Квантно рачунарство има потенцијал да значајно убрза обраду података у неуронским мрежама. Истраживање на овом пољу је у раној фази, али обећава велики напредак у будућности.

Неуронске мреже ће наставити да проналазе примену у новим индустријама и доменима као што су аутономна возила, финансијска тржишта, и паметни градови.

Неуронске мреже представљају један од најмоћнијих и најфлексибилнијих алата у области вештачке интелигенције. Њихова способност да обрађују велике количине података и уче из њих чини их незаменљивим у многим модерним применама. Иако постоје изазови, континуирани напредак у истраживању и развоју обећава светлу будућност за неуронске мреже и њихову примену у различитим областима.

Вештачке неуронске мреже представљају једну од области вештачке интелигенције, инспирисану начином функционисања људског мозга. Ове мреже су математички модели који имитирају процес решавања проблема у људском мозгу. Док се под вештачком неуронском мрежом подразумева математички модел, биолошке неуронске мреже односе се на стварни мозак људи. Вештачке неуронске мреже састоје се од повезаних неурона који комуницирају међу собом слањем порука. Везе између неурона имају тежинске коефицијенте који се могу мењати током тренирања, што омогућава

мрежи да се прилагођава и учи. Ове мреже се могу посматрати као алгоритми надгледаног учења и, захваљујући великом броју унутрашњих променљивих, могу проћи кроз више унутрашњих слојева, што им омогућава већу тачност у поређењу са другим алгоритмима [76] [77].



Слика 7.1 Неурон [78]

Неурон (Слика 7.1 Неурон) је основна ћелија људског мозга, задужена за пренос информација кроз нервни систем. Његова функција се може објаснити у неколико корака:

1. Структура неурона: Неурон се састоји од три основна дела: ћелијског тела, дендрита и аксона. Ћелијско тело садржи језгро и друге органеле неопходне за одржавање ћелије. Дендрити су кратки и разгранати наставци који примају сигнале од других неурона. Аксон је дужи наставак који преноси сигнале од ћелијског тела ка другим неуронима или мишићним ћелијама.
2. Примање сигнала: Сваки неурон добија сигнале преко дендрита од других неурона. Ови сигнали су у виду хемијских супстанци званих неуротрансмитери који прелазе са једног неурона на други преко синапси, малих празнина између неурона.
3. Генерисање електричног импулса: Када неурон прими довољно снажне сигнале, они се сакупљају и, ако прелазе одређени праг, активирају електрични импулс познат као акциони потенцијал. Акциони потенцијал настаје због промена у концентрацијама натријумових (Na^+) и калијумових (K^+) јона кроз ћелијску мембрану.
4. Пренос сигнала: Акциони потенцијал се креће дуж аксона као електрични талас. Код неких неурона, аксон је покривен мијелином, супстанцом која убрзава пренос

импулса. Акциони потенцијал путује до краја аксона, где узрокује ослобађање неуротрансмитера у синапсу.

5. Пренос на следећи неурон: Када неуротрансмитери стигну до синапсе, они прелазе преко ње и везују се за рецепторе на дендритима следећег неурона, чиме покрећу или инхибирају нови акциони потенцијал у том неурону. Овај процес се затим понавља кроз нервни систем.

Овај механизам омогућава брзу и ефикасну комуникацију у мозгу, што је основа за све менталне процесе, од основних рефlekса до сложених когнитивних функција.

Сличности вештачке и природне неуронске мреже су:

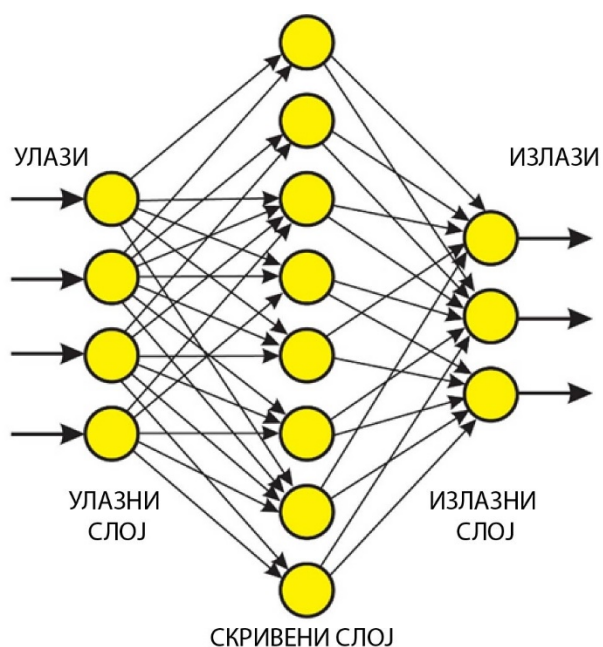
- Вештачке неуронске мреже (ANN) су дизајниране по узору на природне неуронске мреже у људском мозгу. Обе мреже се састоје од чворова (неурона) који су међусобно повезани и размењују информације.
- У обе мреже информације се обрађују кроз слојеве неурона. У природним неуронским мрежама, то су физички неурони, док су у ANN-у то виртуелни чворови у рачунарском моделу.
- Обе мреже имају способност учења и прилагођавања на основу искуства. У природним неуронским мрежама то се постиже кроз пластичност синапси, док у вештачким мрежама тежински коефицијенти међу чворовима се прилагођавају током процеса тренирања.
- И природне и вештачке неуронске мреже обрађују информације на паралелан начин, омогућавајући истовремену обраду више улаза, што побољшава брзину и ефикасност.

Разлике су:

- Природне неуронске мреже у људском мозгу су далеко сложеније и садрже милијарде неурона са стотинама трилиона синаптичких веза. Вештачке неуронске мреже, иако могу бити веома сложене, су знатно мање комплексне и ограничене капацитетом рачунарског хардвера.
- Природни неурони обрађују информације спорије од рачунарских чворова у ANN, али то раде на веома енергетски ефикасан начин. Вештачке неуронске мреже захтевају значајне рачунарске ресурсе и енергију за своје функционисање.
- Природне неуронске мреже уче кроз искуства у стварном времену и континуирано се прилагођавају, док ANN-ови обично уче кроз податке у процесу тренинга и затим се користе за предвиђање или класификацију.

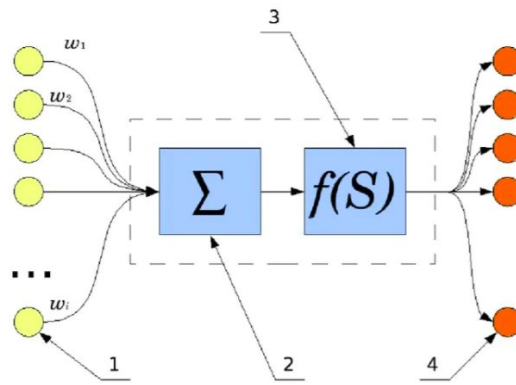
- Природни неурони су биолошке ћелије, док су вештачки неурони математички модели који постоје у оквиру рачунарских система.
- У природним неуронским мрежама, сигнали се преносе у облику хемијских и електричних импулса преко синапси. У вештачким мрежама, пренос информација је искључиво математички и рачунски процес.

Ове сличности и разлике показују како су вештачке неуронске мреже инспирисане природним, али истовремено значајно различите у својој имплементацији и функционалности. Слика 7.2 приказује шематски изглед вештачке неуронске мреже са једним скривеним слојем. Поред њега постоји улазни слој и излазни слој.



Слика 7.2 Изглед вештачке неуронске мреже [79]

Вештачки неурон (Слика 7.3) је основна јединица вештачке неуронске мреже (ANN) и функционише на сличан начин као његов биолошки партнер у људском мозгу, али у контексту рачунарских система.



Слика 7.3 Изглед вештачког неурона

Ево основних елемената и начина функционисања вештачког неурона:

1. Улазни подаци (Input): Вештачки неурон прима улазне податке који могу бити низ бројева или фичера које представљају улазне информације које треба обрадити. Тежине w (Weights): Сваки улаз у вештачки неурон множи се одговарајућом тежином. Тежине су параметри који се користе за промену снаге или важности улазних података у процесу обраде.
2. Суматор (Summation): Производи се везивање улазних података са тежинама, а затим се сумирају. Рачуна се сума производа тежина и улаза.
3. Функција активације (Activation Function): Суматорска вредност прелази кроз функцију активације. Ова функција одређује излаз вештачког неурона на основу сумиране вредности и дефинише када и како ће неурон "пуцати" или активирати се. Популарне функције активације укључују сигмоиду, тангенцијалну хиперболу и ReLU (Rectified Linear Unit).
4. Излаз (Output): Излаз из функције активације је крајњи излаз вештачког неурона, који се прослеђује на следећи неурон или као крајњи излаз мреже у случају излазног слоја.

Процес рада вештачког неурона може бити комплексан у зависности од архитектуре и типа неуронске мреже у коју је укључен. Основна идеја је да вештачки неурони уче да приме улазне податке, примене везане тежине на њих, сумирају вредности, активирају се преко функције активације и генеришу излаз, што омогућава неуронским мрежама да обављају комплексне задатке као што су класификација, регресија или генерисање.

Ток информација кроз неуронску мрежу може се објаснити кроз следеће кораке:

1. Улазни слој (Input Layer):

- Процес започиње улазом података у мрежу. Улазни слој прима податке који могу бити у облику бројева, слика, текста или других формата зависно од апликације.
 - Сваки чвор (неурон) у улазном слоју представља једну карактеристику улазних података.
2. Пренос до скривених слојева (Hidden Layers):
- Информације из улазног слоја се преносе у први скривени слој. Сваки неурон у скривеном слоју прима податке из улазног слоја и рачунава своју излазну вредност на основу тежина, суматора и функције активације.
 - Овај процес се понавља за сваки скривени слој у мрежи. Излазни подаци из једног слоја постају улазни подаци за следећи слој.
3. Сумаризација и функција активације (Summation and Activation):
- У сваком неурону унутар скривеног слоја, улазне вредности се множе одговарајућим тежинама. Ове пондерисане улазне вредности се сумирају да би се добила укупна вредност.
 - Затим се та сума прослеђује кроз функцију активације, која одређује да ли ће неурон бити "активиран" (пренети сигнал даље) и колики ће бити излазни сигнал.
4. Излазни слој (Output Layer):
- Након што информација прође кроз све скривене слојеве, она стиже до излазног слоја. Излазни слој генерише коначни резултат на основу обрађених података.
 - Број неурона у излазном слоју зависи од типа задатка. На пример, за бинарну класификацију, обично је један неурон са излазом који представља једну од две могуће класе. За мултикласну класификацију, број неурона у излазном слоју одговара броју класа.
5. Обрада и ажурирање тежина (Backpropagation):
- Након што је излаз генерисан, мрежа може упоредити предвиђени излаз са стварним резултатом (током тренинга). Ако постоји разлика, мрежа користи алгоритам зван *backpropagation* да би ажурирала тежине у свим неуронима.
 - Овај процес се понавља више пута током тренинга, при чему се тежине прилагођавају тако да мрежа постепено постаје боља у предвиђању или класификацији података.
6. Излазни резултат (Final Output):

- Након тренинга, када мрежа обради нови улазни податак, она користи већ оптимизоване тежине и функције активације да генерише финални излазни резултат. Овај резултат може бити класификација, предвиђање вредности, препознавање обрасца, и слично.

Овај ток информација кроз неуронску мрежу омогућава јој да учи из података и примени стечено знање на нове ситуације, чиме се обављају различити задаци у домену вештачке интелигенције.

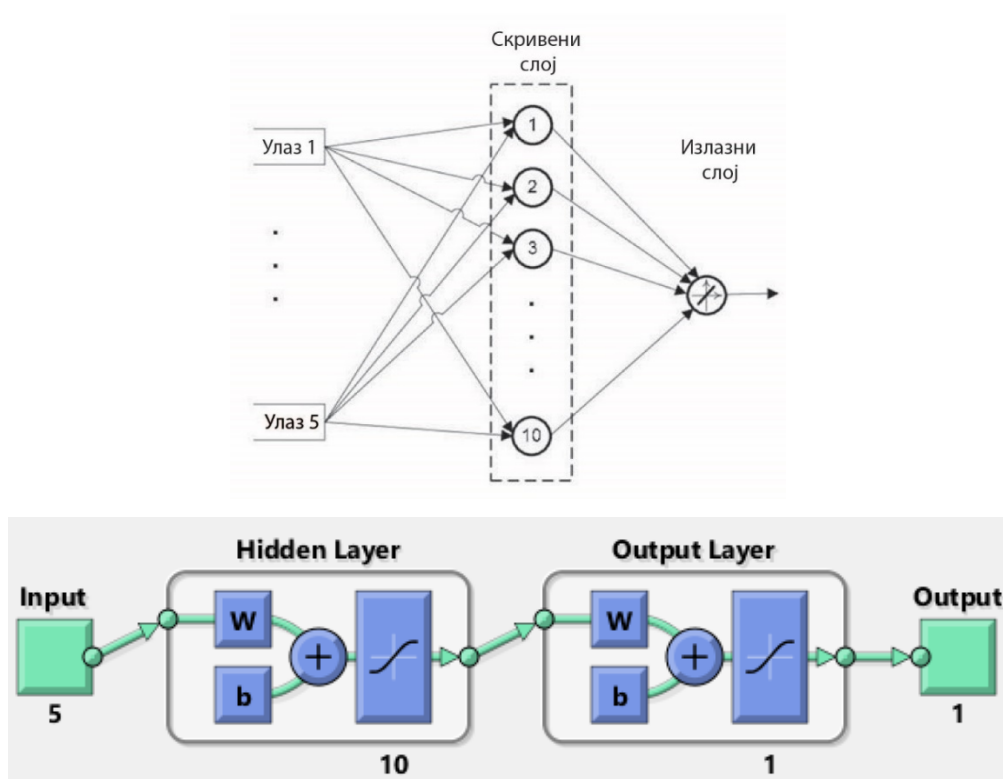
7.2 Прикупљање и обрада података за предвиђање вредности коефицијента трења

Прикупљање података потребних за пројектовање и развој неуронске мреже вршило се тестирањем коефицијента трења на испитном столу описаном у ранијим поглављима дисертације. За прикупљање података, односно за извођење експеримената било је потребно два месеца.

Подаци који су се користили за вештачку неуронску мрежу за предвиђање коефицијента трења на основу познатог хистерезиса гуме су: кинетички и статички коефицијент трења, хистерезис гуме, тврдоћа гуме, храпавост подлоге, брзина кретања и стање подлоге (суво, влажно, подмазано сапуницом).

За потребе предвиђања коефицијента трења коришћена је стандардна вештачка неуронска мрежа са простирањем уназад. ANN је пројектована тако да има четири слоја: улазни слој, два скривена слоја и излазни слој. Променљиве које се користе у улазном мрежном слоју су кинетички коефицијент трења, хистерезис, тврдоћа, храпавост подлоге, брзина кретања и стање подлоге. Променљива у излазном слоју мреже је кинетички коефицијент трења.

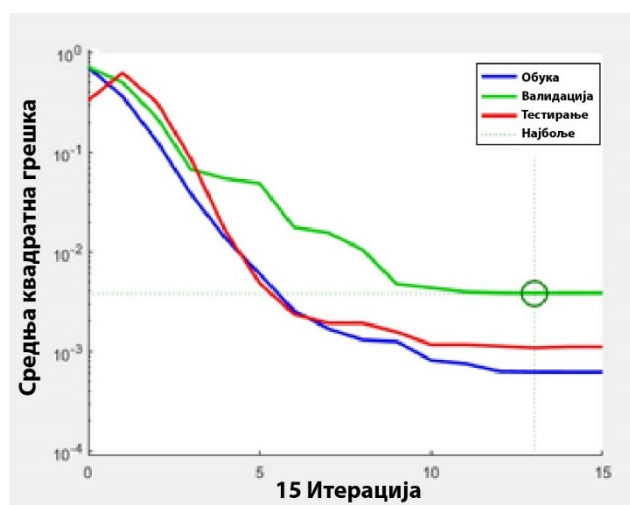
ANN је креирана помоћу софтверског алата MAT LAB. Улазни слој вештачке неуронске мреже се састоји од 5 неурона, док је на излазу 1 неурон. Скривени слој се састоји од 10 неурона, Слика 7.4.



Слика 7.4 Шема неуронске мреже

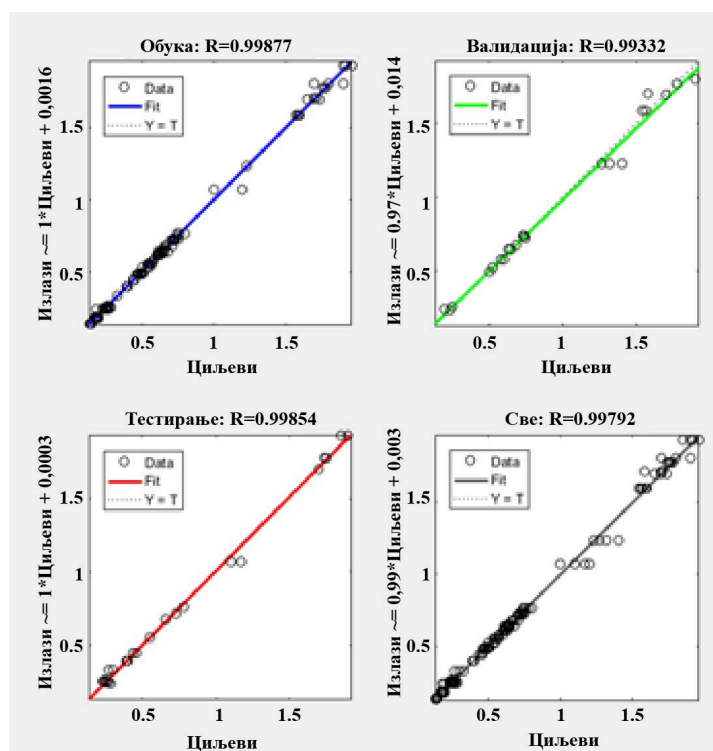
Вештачка неуронска мрежа је тренирана помоћу Levenberg-Marquardt алгоритма простирања уназад. За мерење перформанси коришћена је средња квадратна грешка.

За мерење генерализације мреже коришћен је валидациони узорак од 60 података. Када се генерализација престала побољшавати, обука мреже је заустављена. Током процеса обуке вештачке неуронске мреже (ANN), иако се очекивао већи број итерација, примећено је да је мањи број итерација био довољан за обуку ANN, Слика 7.5.



Слика 7.5 Средња квадратна грешка током процеса обуке вештачке неуронске мреже за предвиђање коефицијента кинетичког трења

За процену перформанси мреже коришћен је коефицијент корелације R , чији су резултати приказани на Слика 7.6.



Слика 7.6 Резултати перформанси мреже за скупове података за обуку, валидацију и тестирање (кинетичко трење).

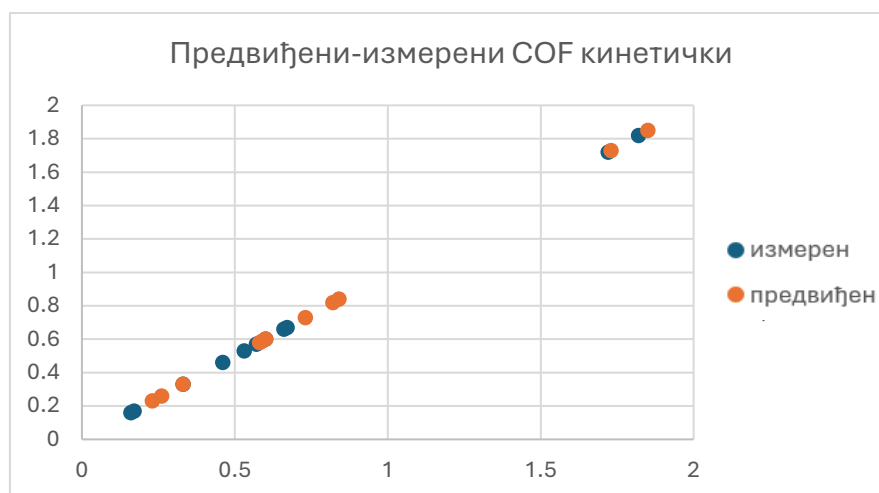
Коефицијент релације R указује на то колико је мрежа ефикасно обучена, поредећи предвиђене „излазе“ са стварним „циљевима“. Већа вредност R означава боље перформансе мреже, при чему $R=1$ представља савршено поклапање између „циљева“ и „излаза“. Као што је приказано на Слика 7.6, коефицијент корелације током обуке ANN-а био је $R=0,99877$, што указује на изузетну обуку. Обучена мрежа је затим тестирана на засебном тестном скупу података, где је постигнут $R=0,99854$. Укупне перформансе обучене ANN биле су $R=0,99792$, што се сматра веома задовољавајућим резултатом.

Табела 7.1 и Табела 7.2 показују измерене и предвиђене вредности коефицијената трења (кинетичког и статичког) на основу 5 улазних параметара и 3 сета мерења којим је мрежа тренирана. Укупан број мерења којим је мрежа тренирана је 180 за кинетички коефицијент трења и 60 за статички коефицијент трења.

Табела 7.1 Вредности предвиђеног и измереног кинетичког коефицијента трења μ_k

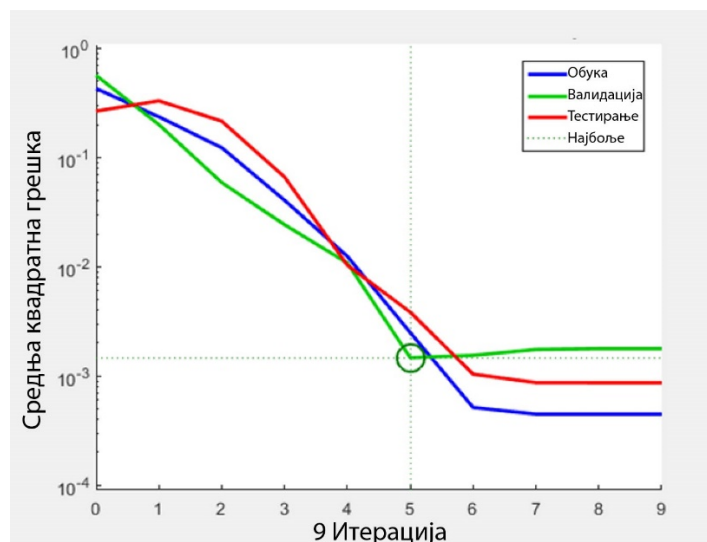
Хистерезис	Тврдоћа	Храпавост	Брзина	Стање подлоге		Измерен μ_k	Предвиђен μ_k
0.35	65	0.03	50	1	суво	1.72	1.73
0.35	65	0.03	300	1	суво	1.82	1.85
0.35	65	4.51	50	1	суво	0.57	0.84
0.35	65	4.51	300	1	суво	0.67	0.73
0.35	65	0.03	50	2	влажно	0.33	0.33
0.35	65	0.03	300	2	влажно	0.17	0.26
0.35	65	4.51	50	2	влажно	0.66	0.82
0.35	65	4.51	300	2	влажно	0.60	0.59
0.35	65	0.03	300	3	сапуница	0.16	0.23
0.35	65	4.51	50	3	сапуница	0.53	0.58
0.35	65	4.51	300	3	влажно	0.46	0.60

На Слика 7.7 приказан су предвиђени и измерени коефицијенти кинетичког трења.



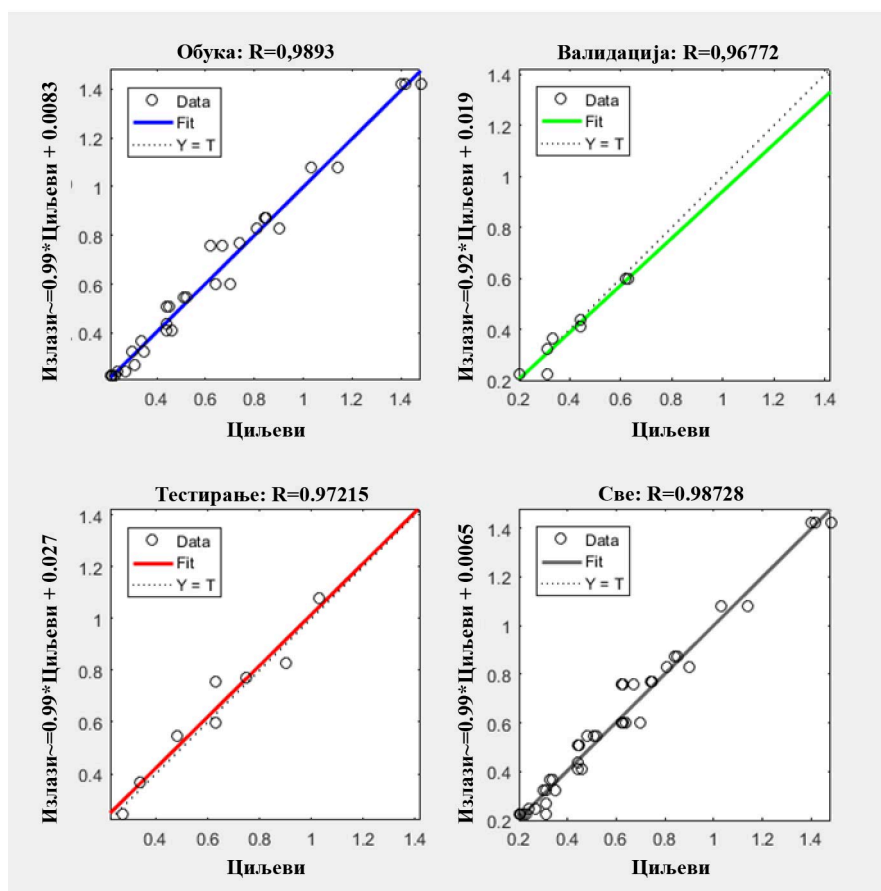
Слика 7.7 Предвиђени и измерени кинетички коефицијент трења

Слика 7.8 приказује средњу квадратну грешку током процеса обуке вештачке неуронске мреже за предвиђање коефицијента статичког трења.



Слика 7.8 Средња квадратна грешка током процеса обуке вештачке неуронске мреже за предвиђање коефицијента статичког трења

На Слика 7.9 приказани су резултати перформанси мреже за скупове података за обуку, валидацију и тестирање (статичко трење).

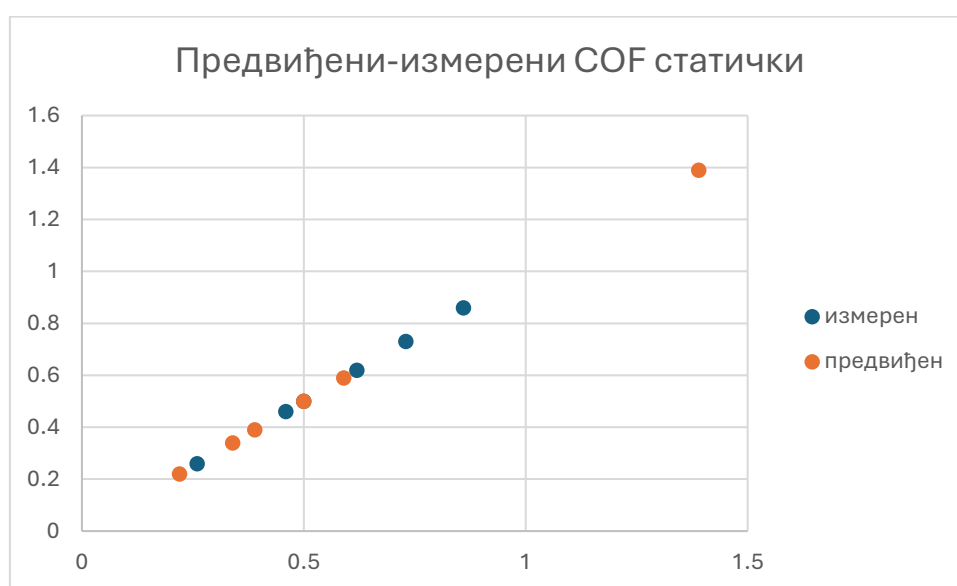


Слика 7.9 Резултати перформанси мреже за скупове података за обуку, валидацију и тестирање (статичко трење).

Табела 7.2 Вредности предвиђеног и измереног статичког μ_k

Хистерезис	Тврдоћа	Храпавост	Брзина	Стање подлоге		Измерен μ_s	Предвиђен μ_k
0.35	65	4.51	1	1	суво	0.73	0.59
0.35	65	4.51	1	2	влажно	0.62	0.5
0.35	65	4.51	1	3	сапуница	0.46	0.34
0.35	65	0.03	1	1	суво	0.86	1.39
0.35	65	0.03	1	2	влажно	0.5	0.39

Предвиђени и измерени статички коефицијент трења приказани су на слици Слика 7.10.



Слика 7.10 Предвиђени и измерени статички коефицијент трења

Како су предвиђени резултати добијени неуронском мрежом задовољавајући, може се закључити да се неуронска мрежа може користити за предвиђање коефицијента трења.

За даље истраживање и побољшање прецизности предвиђања неуронске мреже потребно је урадити већи број експеримената како би се повећао број улазних података за тренирање мреже.

8. Закључак и правци даљег истраживања

Трење између обуће и пода представља веома важну област истраживања која има велики утицај на друштво и са здравственог аспекта, посматрајући здравље људи и са економског (друштвеног), посматрајући последице које узрокују падови настали услед недовољног трења између обуће и пода. Значај наведених истраживања показују и подаци да се први експерименти који се тичу ове области јављају још пре 100 година. Са развојем обуће и материјала који се користе за њихову израду као и подова и материјала који се користе као подлога за ходање, значајно се повећава и заинтересованост истраживача и произвођача за триболошку анализу контакта обуће и пода. Развој истраживања довео је до појаве и стандарда који се односе на поступке одређивања противклизних својстава обуће и подова и имају за циљ смањење могућности повреда који су последица услед неадекватних триболошких услова. Највећи интерес за наведена истраживања најчешће имају осигуравајућа друштва да би спречила трошкове настале услед повреда, као и национални институти за здравље и безбедност људи.

Гума је материјал са јединственим карактеристикама које омогућавају њену широку примену, посебно у апликацијама које захтевају повећан коефицијент трења. У истраживањима трења гуме, тврдоћа представља једну од кључних физичко-механичких особина које се анализирају. У складу са постављеним циљем истраживања докторске дисертације, истраживања спроведена у оквиру докторске дисертације су доказала да коефицијент трења, у одређеним условима контакта обуће и подлоге, зависи и од хистерезиса гуме и да ако је хистерезис гуме познат, могуће применом статистичких метода или савремених алата заснованих на вештачкој интелигенцији предвидети триболошка својства контакта.

У овој дисертацији је истраживано како хистерезис гуме утиче на коефицијент трења, при чему је коришћена гума исте тврдоће, али различитих вредности хистерезиса. Експерименти су спроведени на гранитним плочама како би се елиминисао утицај тврдоће подлоге. Резултати су показали да присуство влаге и сапунског раствора значајно смањује коефицијент трења у односу на суве услове.

Уочено је да се коефицијент трења повећава са порастом хистерезиса гуме, али да брзина кретања (50 mm/s и 300 mm/s) нема значајан утицај на резултате. Такође, храпавост подлоге игра важну улогу: противклизне површине показују другачије

вредности коефицијента трења од глатких. У сувим условима, хистерезис има минималан утицај, али његов значај расте у присуству влаге и сапунице.

Највећи коефицијент трења је забележен код гуме са најмањим хистерезисом (1,2–1,35 у сувим условима), док је у влажним и сапуњавим условима ова вредност драстично опала (на 0,60–0,65). Повећање хистерезиса углавном доводи до већих вредности коефицијента трења, осим у случају гуме са највећим хистерезисом и тврдоћом од 60ShA.

Регресиона анализа је показала ограничења због претпоставке линеарности, па је коришћена Тагучи метода, која је пружила прецизније резултате. Ова метода је указала на то да храпавост значајно утиче на повећање коефицијента трења у влажним и сапуњавим условима, док у сувим условима има супротан ефекат. Противклизне површине у сувим условима имају довољно висок коефицијент трења да смање ризик од клизања, али у ризичним условима (влажно, сапуњаво) храпавост подлоге игра најважнију улогу.

Резултати су показали да је при дизајну гумених материјала важно узети у обзир не само тврдоћу већ и хистерезис, како би се постигле оптималне вредности коефицијента трења у различитим условима употребе.

На основу експерименталних резултата као и коришћењем аналитичких метода може се закључити да хистерезис гуме има значајан утицај на коефицијент трења између узорак гуме од које се производе ђоновци ципела и гранитних плоча које представљају подлогу за ходање, што представља и један од научних доприноса ове дисертације. Резултати показују да се за распон хистерезиса гуме (24%-45%), а које имају исту или тврдоћу коефицијент трења мења у распону од 0,1 до 1,82 за глатку плочу и од 0,45 до 1,35 за антислип плочу. Такође експерименти показују да се утицај тврдоће гуме на коефицијент трења не може посматрати одвојено без хистерезиса. Већа одступања у коефицијенту трења (до 18 пута) код глатке плоче указују на то да је код ње утицај хистерезиса мањи услед доминантног утицаја адхезије на коефицијент трења. Код противклизне плоче, која има знатно већу храпавост у односу на глатку плочу, одступања су мања (до 3 пута) јер је утицај хистерезиса на коефицијент трења већи услед деформација које настају услед кретања гуме по храпавој површини.

Допринос дисертације представља и конструисање специјалног испитног стола за одређивање коефицијента трења између узорак гуме и подлоге. Испитни сто омогућује испитивања у различитим условима подлоге (суво, влажно, са сапуницом), са великим распонем брзина клизања (0,16-500mm/s), различитим нормалним оптерећењем као

различитим врстама подлоге (ламинат, гранитне плоче, паркет, керамичке плочице, винил...).

Развој вештачке неуронске мреже за предвиђање коефицијента трења, такође представља један од научних доприноса. Наиме у оквиру дисертације је креирана неуронска мрежа која на основу вредности хистерезиса и осталих параметара предвиђа коефицијент трења за задате услове.

Нумеричке методе (регресија и Тагучи метод) доказују значај утицаја хистерезиса на коефицијент трења. Регресија услед немогућности да испрати нелинеарну природу појаве коефицијента трења код гуме даје нешто лошије резултате у односу на Тагучи метод који даје бољу анализу података за овакву поставку експеримента. Наведене методе јасно идентификују и ранг, односно утицај свих посматраних параметара на вредност коефицијента трења. На основу спроведених истраживања може се закључити да услови контакта имају доминантан утицај на вредност коефицијента трења, што је логично и у складу са експерименталним резултатима. Такође, услови површине утичу на значај других параметара, где параметри показују различите трендове за суве услове с једне стране и влажне и сапуњаве с друге стране. У сувим условима примарни механизам трења је повезан са адхезијом, што објашњава наведене разлике у трендовима. Увођењем средстава за подмазивање (вода, сапун) адхезија опада, а остали параметри добијају на значају и мењају свој укупан утицај. Пораст хистерезиса до одређене тачке (0,35) доводи до пада коефицијента трења. Са даљим повећањем хистерезиса до 0,39, коефицијент трења расте, а потом поново опада са даљим порастом хистерезиса. Овај ефекат је такође примећен у експерименталним резултатима у већини случајева, осим у сувим условима где експеримент показује да коефицијент трења расте за противклизну плочицу при свим вредностима хистерезиса изнад 0,35. Разлог за то је потребно додатно истражити, али је практично корисно знати да се најбоља противклизна својства могу постићи са поменутих вредностима хистерезиса у опасним (клизавим) ситуацијама (влажно, сапуњаво).

Даљи правци истраживања би били усмерени на испитивање више различитих смеша са различитим вредностима хистерезиса и додавање параметара који би могли додатно да утичу на коефицијент трења између обуће и подлоге као што је промена нормалног оптерећења. Повећањем броја експеримената добио би се и већи број података за анализу нумеричким методама, као и већа тачност предвиђања вредности коефицијента трења коришћењем неуронских мрежа. Истраживање је могуће проширити и додавањем

различитих подлога (различите хртавости, тврдоће) као и различитим контаминантима који би били између узорака ђонова и самих подлога.

9. Литература

- [1] T K Coutney, G S Sorock, D P Manning, J W Collins, M A Holbein-Jenny, "Occupational slip, trip, and fall-related injuries--can the contribution of slipperiness be isolated?," *Ergonomics*, pp. 1118-1137, 2001.
- [2] C. Wetzel, U. Windhovel, D. Mewes, O. Ceylan, „Slipping on pedestrian surfaces: methods for measuring and evaluating the slip resistance,” *Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, pp. 256-267, 2015.
- [3] „<https://nfsi.org/>,” 2024. [Na mreži].
- [4] Strobel, Caitlin Moore, Menezes, Pradeep L., Lovell, Michael R., Beschoner, Kurt E., „Analysis of the contribution of adhesion and hysteresis to shoe-floor lubricated friction in the boundary lubrication regime,” *Tribology Letters*, t. 47, br. 3, 2012.
- [5] „<https://www.coirubber.com/rubber-engineering-resilience-hysteresis/>,” [Na mreži].
- [6] Lorenz B N, J Persson, G Fortunato, M Giustiniano and F Baldoni, „Rubber friction for tire tread compound,” *Journal of Physics: Condensed matter*, 2013.
- [7] M. J. H. Cowap, S. R. M. Moghaddam, P. L. Menezes and K. E. Beschoner, „Contributions of adhesion and hysteresis to coefficient of friction between shoe and floor surfaces: Effects of floor roughness and sliding speed,” *Tribology - Materials Surfaces & Interfaces*, 2015.
- [8] Farid Fouad Ezzat, Wadud Ali, „Friction Coefficient of Rough Indoor Flooring Materials,” *Journal of King Abdulaziz University-Engineering Sciences*, t. Vol.19 No.2, pp. 53-70, 2008.
- [9] Ewa Sudoł, Ewa Szewczak and Marcin Małek, „Comparative Analysis of Slip Resistance Test Methods for Granite Floors,” *Materials*, t. 14 (5), 2021.
- [10] Стаменковић Д, Ђурђановић М, Трибологија пресованих спојева, монографија, Ниш: Машински факултет Ниш, 2005.
- [11] Stamenković D., „Istraživanje nosivosti presovanog spoja kao tribosistema u okviru pogonskih sklopova železničkih vozila,” 1999.
- [12] М. Ђурђановић, „Istraživanje procesa oblikovanja krajeva cevnih profila trenjem, doktorska disertacija,” Маши́нский факультет Ниш, 1990.
- [13] B. Ivković, A. Rac, Tribologija, Kragujevac, 1995.
- [14] Banić M., Stamenković D., Miltenović V., Milošević M., Miltenović A., Đekić P., Rackov M, „Prediction of Heat Generation in Rubber or Rubber-Metal Springs,” *Thermal Science (ISSN 0354-9836)*, t. 16, br. 2, pp. 593 - 606, 2012.
- [15] F. Bowden, D. Tabor, Friction - An Introduction to Tribology, 1982.
- [16] Ronald J. Schaefer, „Mechanical Properties of Rubber“.
- [17] A, Gent, „Engineering with rubber: how to design rubber components,” *Carl Hanser Verlag GmbH Co KG*, 2012.
- [18] М, Банић, „Методолошки приступ развоју гумено металних опруга, докторска дисертација,” 2015.
- [19] Pau M, Aymerich F, Ginesu F, Ishida M, Chen H, „Evaluation of the Influence of Surface Conditions on Wheel-Rail Contact Performances,” *WCRR 2001*, 2001.

- [20] Courtney, T.K, Sorock, G.S, Manning, D.P, Collins, J.W, Holbein-Jenny, M.A, „Occupational slip, trip, and fall-related injuries—can the contribution of slipperiness be isolated?“, *Ergonomics*, t. 44, pp. 1118-1137, 2001.
- [21] „<https://www.kvis.ac.th/userfiles/files/pdf/>“, [Na mreži].
- [22] „ASTM 832 D Standard Practice for Rubber Conditioning For Low Temperature Testing“.
- [23] A.B. Davey, A.R. Payne, Rubber in engineering practise, 1964.
- [24] R.H. Smith, „Analyzing friction in the design of rubber products and their paired surfaces“, *CRC*, 2008.
- [25] B.N.J. Persson, „Contact mechanics for randomly rough surfaces“, *Surface Science Reports* 61, pp. 61-67, 2006.
- [26] Stachowiak W, Batchelor A, „Engineering Tribology“, *Elsevier*, 2013.
- [27] B. Lorenz, „Contact Mechanics and Friction of Elastic Solids on Hard and Rough Substrates (diss)“, *RWTH Aachen University*, 2012.
- [28] Kim I.J, Nagata H, „Research on Slip Resistance Measurements — A New Challenge“, *Industrial Health*, tom. 46 od 266-76, 2008.
- [29] Banić M, Stamenković D, Milošević M, Miltenović A, „Tribology aspect of rubber shock absorbers development“, *Tribology In Industry*, t. 35, pp. 225-231, 2013.
- [30] D. Stamenković, M. Nikolić, M. Milošević, M. Banić, A. Miltenović, M. Mijajlović, „Tribology aspect of rubber based part used in engineering“, *Tribology in industry*, t. 36, br. 1, pp. 9-16, 2014.
- [31] Person, B.N.J., „Sliding friction“, *Elsevier-Surface Science Reports* 33, pp. 89-119.
- [32] „<http://www.multiscaleconsulting.com/experimental/adhesion/>“, [Na mreži].
- [33] „<http://insideracingtechnology.com/tirebkexerpt1.htm>“, [Na mreži].
- [34] „HSE“, [Na mreži]. Available: <https://www.hse.gov.uk/>.
- [35] Czichos, „Basic Tribological Parameters“, *Lubrication and Wear Technology*, pp. 762-774, 1992.
- [36] Stamenković D, Nikolić M, Vasin Lj, Banić M, Miltenović A, „Research on tribology phenomena in every day life“, u *14th International Conference on Tribology – Serbiatrib 2015*, Kragujevac, 2015.
- [37] A. Рац, "Основи трибологије", Београд: Машински факултет, Београд,, 1991..
- [38] Саша Милојевић, „Идентификација триболошких параметара у процесу хабања“, Докторска дисертација, „Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [39] „BS 903 Methods of testing“.
- [40] „BS EN 13036-4 Road and airfield surface characteristics – Test methods“.
- [41] „BS EN 13893 Resilient, laminate and textile floor coverings – Measurement of dynamic coefficient of friction on dry floor“.
- [42] „DIN 51130 Testing of floor coverings“.
- [43] „DIN 51131 Testing of floor coverings - Determination of the anti-slip property“.
- [44] D. Stamenković, M. Banić, M. Nikolić, A. Miltenović, P. Đekić, „Influential Parameters of Footwear Slip Resistance“, u *Serbiatrib 2019*, Kragujevac, 2019.
- [45] D. Mewes, „Measuring the slip resistance of floorings and footwear“, *Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance*.

- [46] „ISO 13287 Personal protective equipment - Footwear - Test method for slip resistance“.
- [47] R. Hunter, „A method of measuring frictional coefficients of walk way materials,“ 1929.
- [48] Clarke, James, Carré, Matt, Damm, Loic, Dixon, Sharon, „Understanding the influence of surface roughness on the tribological interactions at the shoe-surface interface in tennis,“ *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, t. 226, br. 7, 2012.
- [49] Demarch, Aline, Waterkemper, Angela, Pasini, Djeisa, Ruzza, Sergio, Montedo, Oscar R.K., Angioletto, Elidio, „Effects of roughness parameters on slip resistance for different methods used to determine the coefficient of friction for ceramic floor tiles,“ *Ceramics International*, t. 47, br. 17, 2021.
- [50] Iraqi, Arian, Vidic, Natasa S. Redfern, Mark S. Beschorner, Kurt E., „Prediction of coefficient of friction based on footwear outsole features,“ *Applied Ergonomics*, t. 82, 2020.
- [51] Barbara E. Sabey, G. N. Lupton, „Friction on wet surfaces of tire tread type vulcanizates,“ *Rubber Chemistry and Technology*, t. 37, br. 4, p. 878–893, 1964.
- [52] B.N.J Persson, „Theory of rubber friction and contact mechanics,“ *Journal of Chemical Physics*, t. 118, 2001.
- [53] Markus Lindner, Matthias Kröger, Karl Popp, Holger Blume, „Experimental and analytical investigation of rubber friction,“ *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, pp. 101-102, 2004.
- [54] Max Marian, Stephan Tremmel, „Current Trends and Applications of Machine Learning in,“ *Lubricants*, t. 9, br. 9, 2021.
- [55] Wentao Chen, Ying Li, Zhifeng Liu, Caixia Zhang, Yongsheng Zhao, „Prediction model for bearing surface friction coefficient in bolted joints based on GA-BP neural network and experimental data,“ *Tribology International*, t. 201, 2024.
- [56] Fanhao Zhang, Wenguang Wu, Shuangyue Tian, Menglong Xu, „A Mind Evolutionary Algorithm Optimized Back-Propagation Neural Network Model for Tire-Road Friction Coefficient Prediction,“ *Developments and Applications in SmartRail, Traffic, and Transportation Engineering*, t. 1209.
- [57] Wu Wenguang, Zhang, Fanhao, Xu, Menglong, „Identification of road friction coefficient based on Elman neural network,“ *Journal of Chongqing University*, t. 46, br. 3, pp. 118-128, 2023.
- [58] Zhaoyun Sun, Xueli Hao, Wei Li, Ju Huyan, and Hongchao Sun, „Asphalt pavement friction coefficient prediction method based on genetic-algorithm-improved neural network (GAI-NN) model,“ *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2022.
- [59] Shuwen Wang, Yang Yu, Shuangxia Liu, David Barton, „Braking Friction Coefficient Prediction Using PSO–GRU Algorithm Based on Braking Dynamometer Testing,“ *Lubricants* 2024, , 2024.
- [60] Oleksiy Gensytskyy, Pratyush Nandi, Martin J.-D. Otis, Clinton Enow Tabi & Johannes C. Ayena , „Soil friction coefficient estimation using CNN included in an assistive system for walking in urban areas,“ *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, t. 14, p. 14291–14307, 2023.
- [61] Yannis L Karnavas, Achilles Vairis, „Modelling of Frictional Phenomena using Neural Networks: Friction Coefficient Estimation,“ u *Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2011*, Crete, 2011.
- [62] Joaquin Garcia-Suarez , „Neural Networks and Friction: Slide, Hold, Learn,“ *physics.geoph*, 2024.

- [63] „DIN 53505 Shore A and Shore D hardness testing of rubber“.
- [64] „ISO 7619 Determination of indentation hardness“.
- [65] „ASTM D1415 Standard Test Method for Rubber Property—International Hardness“.
- [66] SRPS.G.S2.125., „Одређивање тврдоће методом утискивања игле (тврдоћа по Шору А и D),“ Институт за стандардизацију Србије, 1986.
- [67] П. С. Ђекић, „Анализа утицаја рециклираног гуменог праха на својства и структуру гумених смеша,“ 2017.
- [68] Д. Стаменковић, М. Банић, М. Николић, Трбологија, Машински Факултет Ниш, 2020.
- [69] Милчић Д., Банић М., Милтеновић А., Милчић М, Машински елементи, Ниш: Машински факултет Универзитет у Нишу, 2015.
- [70] „<https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/finance/regression-analysis/>,“ [Na mreži].
- [71] Ranganathan, S.; Manivannan, I., „Evaluation of Tribological Process Parameters of Al6061 + Nano Sic + Gr Hybrid Nano Composites Using Taguchi Technique,“ 2023.
- [72] Khatkar, S.K.; Suri, N.M.; Kant, S.; Pankaj, „A Review on Mechanical and Tribological Properties of Graphite Reinforced Self Lubricating Hybrid Metal Matrix Composites.,“ *Reviews on advanced materials science* 2018, t. 56, pp. 1-20, 2018.
- [73] Ashwath, P.; Xavior, M.A., „Processing Methods and Property Evaluation of Al₂O₃ and SiC Reinforced Metal Matrix Composites Based on Aluminium 2xxx Alloys,“ *Journal of Materials Research*, t. 31, p. 1201–1219, 2016.
- [74] Dhiman, M.; Dwivedi, D.K.; Sehgal, R.; Bhat, I., „Effect of Iron on Wear Behavior of As-Cast and Heat-Treated Hypereutectic Al–18Si–4Cu–0.5Mg Alloy: A Taguchi Approach.,“ *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 2014, t. 228, p. 2–16, 2014.
- [75] Kelsy, B.; Nwobi-Okoye, C.; Chukwuemeka, E.; Uche, R., „Multi Objective Optimization of Novel Al-Si-Mg Nanocomposites: A Taguchi-ANN-NSGA-II Approach.,“ *Journal of Engineering Research* 2023, 2023.
- [76] Z. Nagy, „Artificial Intelligence and Machine Learning Fundamentals: Develop real-world applications powered by the latest AI advances,“ *Packt Publishing*, 2018.
- [77] С. Гавран, „Вештачке неуронске мреже: преглед и примена,“ 2016.
- [78] „biologija.rs,“ [Na mreži].
- [79] „<http://pc.pcpres.rs/tekst.php?id=9688>,“ [Na mreži].
- [80] D. Stamenković, „Science in Safety, the bearing tribology has on slips, trips and falls,“ *Health&Safety International*, pp. 59-65, 2014.
- [81] S. D., „The bearing tribology has on slips, trips and falls,“ *Science in Safety*, pp. 59-65, 2014.
- [82] „Floors for Indoor Sports,“ *Sport England*, 2006.
- [83] V. Miltenović, Маши́нски елементи-облици, прора́чу́н, примена, 2009.
- [84] J. Oliveira, „Process Improvement and Optimization. In Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition); Fuquay, J.W., Ed.; Academic Press: San Diego,“ *Oliveira, J.C. Plant*, p. 263–272, 2011.
- [85] Z. Nagy, „Artificial Intelligence and Machine Learning Fundamentals: Develop real-world applications powered by the latest AI advances,“ *Birmingham: Packt Publishing*, 2018.

- [86] H. Chen, J. Chen, J. Ding, „Data evaluation and enhancement for quality improvement of machine learning,“ *IEEE Transactions on Reliability*, t. 70, br. 2, pp. 831-847, 2021.
- [87] Markus Lindner, Walter Sextro, Karl Popp, „Hysteretic Friction of a Sliding Rubber Element,“ *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, pp. 101 - 102, 2004.
- [88] Gent A, Engineering with rubber: how to design rubber components, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012.
- [89] A. Tiwari, T. Tolpekina Hans van Benthem, M.K. Gunnewiek and B.N.J. Persson, „Rubber adhesion and friction: role of surface energy and contamination films,“ 2020.
- [90] P. Marchal, M. Jacques, A. Sigari, „Comparison of measurement methods of the friction coefficient of floor coverings,“ *INRS/CSTB joint publication*.
- [91] R.H., Smith, „Analyzing friction in the design of rubber products and their paired surfaces,“ *CRC*.
- [92] Nikolić M, Stamenković D, Banić M, Miltenović A, „Biomechanic and Tribology in Human Walking,“ u *Proceedings of 15th International Conference on Tribology Serbiatrib '17*, 2017.

Биографија

Милан Николић, дипломирани машински инжењер, рођен је 12.06.1978. године у Нишу. Завршио основну школу „Свети Сава” у Нишу и Гимназију „Бора Станковић” у Нишу. Школске 1997/98. отпочео је студије на Машинском факултету Универзитета у Нишу, а исте је завршио почетком 2006. године. Дипломирао је на профилу Машинске конструкције и механизација са средњом оценом 7,27 у току студија и оценом 10 на дипломском раду из области трибологије на тему предвиђања трења између пнеуматика и коловоза.

Од 2006.-2010. године ангажован је од стране неколико фирми на пословима развоја и производње медицинских уређаја као и на пословима руковођења у интернационалној компанији за veleпродају ауто делова. Од 2010. до данас власник фирме за консалтинг услуге у области развоја и производње широког спектра производа као и у области финансија. У том периоду учествовао и реализовао бројне пројекте од којих су значајнији: Развој производа за манипулацију шпулнама помоћу роботске руке за компанију „Continental“ Немачка, Пројектовање CNC машине за депалетизацију поврћа, Пројектовање алата за одсецање, допремање и инсертовање диода помоћу роботске руке „Gruner“ Немачка, Пројектовање машина за кондиторску индустрију (млинови, пумпе, танкови, мешачи, цевоводи, транспортери), израда програма за израду разних производа на CNC машинама. Поред послова пројектовања радио и на пословима консалтинга у области имплементације ISO стандарда, CE знака као и осталим пословима везаним за машинско инжењерство. Повремено ангажовање на рачунским и лабораторијским вежбама из предмета Трибологија на Машинском факултету Универзитета у Нишу у периоду од 2007. до данас. Од 2018. године ангажован као предавач из привреде на Академији техничко-васпитачких струковних студија у Нишу на више предмета на основним и мастер струковним студијама.

Милан Николић је до сада публикувао више од 20 научних радова и уџбеник из предмета Трибологија.

Током своје професионалне каријере, учествовао на више пројеката: Laboratory capacity building for Industry 4.0, RCF 2022.-2025., A new aseptic high flow rate industrial pumps for high-density, viscous, abrasive, and aggressive fluids, Green Voucher 2018.-2019., „Симултано пројектовање иновираног производа за унапређење конкурентности предузећа“ Академија техничко-васпитачких струковних студија, „Компетенције студената“ Академија техничко-васпитачких струковних студија. У 2019. години учествовао на стручном усавршавању у компанији Mitsubishi electric, Тренинг семинар, Имплементација робота у индустрији, Краков, Пољска.

Ожењен је, има двоје деце и живи у Нишу.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

**„Прилог истраживању утицаја хистерезиса гуме на коефицијент трења
клизања у контакту обуће и пода“**

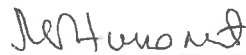
која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Николић Милан

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

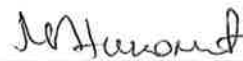
Наслов дисертације:

**„Прилог истраживању утицаја хистерезиса гуме на коефицијент трења
клизања у контакту обуће и пода“**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Николић Милан

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Прилог истраживању утицаја хистерезиса гуме на коефицијент трења клизања у контакту обуће и пода“

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство **(CC BY)**
2. Ауторство – некомерцијално **(CC BY-NC)**
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде **(CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**
5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**
6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)⁴**

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Николић Милан

⁴ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног
родитеља и име
Датум и место рођења

Николић, Тихомир Милан
12.06.1978. године, Ниш

Основне студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена

Универзитет у Нишу
Машински факултет
Машинске конструкције, развој и инжењеринг
Дипломирани машински инжењер
1997.
2006.
7,27

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена
Научна област
Наслов завршног рада

Докторске студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Година уписа
Остварен број ЕСПБ бодова
Просечна оцена

Универзитет у Нишу
Машински факултет
Машинско инжењерство
2020.
150
9,50

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске
дисертације
Име и презиме ментора,
звање
Број и датум добијања
сагласности за тему
докторске дисертације

Прилог истраживању утицаја хистерезиса гуме на коефицијент трења клизања у
контакту обуће и пода
Милан Банић, ванредни професор
НСВ број 8/20-01-003/24-005 од 01.04.2024. године

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна
Број поглавља
Број слика (шема, графикана)
Број табела
Број прилога

100
10
60
16

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ

Примљено: 21.3.2025.			
Орг.јед.	Број	Прилог	Датум
	612-80-	14/25	

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
	М. Николић, М. Банић, Д. Стаменковић, М. Симоновић, А. Милтеновић, В. Павловић, The influence of rubber hysteresis on the sliding friction coefficient in contact between viscoelastic bodies and a hard substrate, Appl. Sci. 2024, 14(24), 11820; https://doi.org/10.3390/app142411820	
1	<i>Рад приказује утицај хистерезиса гуме на коефицијент трења између узорка гуме за ђонове и грешитних плоча. У експериментима су коришћене четири врсте гумених материјала сличне тврдоће, али различитих хистерезисних својстава, као и две граничне врсте хистерезиса (глинка и противглизна). Хистерезис гуме је експериментално одређен на једноосној тест машини, а коефицијент трења мерен је уређајем заснованим на методи силе повлачења, у складу са стандардом EN 13893:2011. Мерења су обављена при брзинама од 50 mm/s и 300 mm/s на различитим површинама. Анализом података, коришћењем регресионе анализе и Тајучи методе, утврђено је да смеша гуме сличне тврдоће могу имати различит хистерезис и триболошке карактеристике.</i>	M22
2	Душан Стаменковић, Милан Банић, Милан Николић, Мирослав Мијајловић, Милош Милошевић, Methods and Principles of Determining the Footwear and Floor Tribological Characteristics, TRIBOLOGY IN INDUSTRY, 2017. Волумен 39 (број 3), стр. 340-348. <i>У раду се врши преглед стандарда о противглизним својствима обуће и подних облога, објашњавајући методе испитивања и процедуре за одређивање отпорности на клизање у различитим условима. Представљене су анализе и поређења тестова дефинисаних овим стандардима, наглашавајући важност испитивања статичког и кинетичког трења. Рад идентификује сертификоване српске институције за наведена испитивања и дефинише услове лабораторијског мерења силе трења у контакту материјали подова и обуће, извршеног на Машинском факултету у Нишу. Резултати мерења и њихова анализа су такође представљени у раду.</i>	M24
3	Душан Стаменковић, Милан Николић, Милош Милошевић, Милан Банић, Александар Милтеновић, Мирослав Мијајловић, Tribological Aspect of Rubber Based Parts used in Engineering, TRIBOLOGY IN INDUSTRY, 2014. Волумен 36 (број 1), стр. 9-16. <i>Рад даје преглед постојећих стандарда и изведених истраживања у области испитивања трења гуме у контакту са различитим материјалима. Такође, рад обухвата преглед теоријских и експерименталних студија трења гуме у контакту са другим материјалима, које су извршене на Машинском факултету у Нишу.</i>	M24
4	Милан Николић, Милан Банић, Милан Павловић, Вукашин Павловић, Александар Милтеновић, Милош Симоновић, Prediction of the Friction Coefficient Based on the Hysteresis Value of Shoe Sole Rubber, Facta Universitatis: Series: Automatic Control and Robotics, 23(2), 2024 <i>Рад приказује коришћење вештачке неуронске мреже (ANN) за предвиђање коефицијента трења ђонова ципела израђених од гуме. У раду се користе вредности хистерезиса гуме и други фактори попут тврдоће, хистерезиса наочница, брзине клизања и услова површине као улазни подаци за тренирање вештачке неуронске мреже. Истраживање наглашава значај вредности хистерезиса гуме као параметра који утиче на коефицијент трења и омогућава његово предвиђање употребом вештачких неуронских мрежа.</i>	M52
5	Милан Николић, Душан Стаменковић, Милан Банић, Analysis of static friction of solid and viscoelastic bodies, 2023., 18th International Conference on Tribology – SERBIATRIB '23 Proceedings, странице 815-819. <i>У овом раду, статичко трење је дефинисано као сила која супротставља релативном кретању двеју површина у контакту, када су у миру једна у односу на другу. Иако се уобичајено сматра да је сила кинетичког трења мања од статичког, овај однос може варирати. У експерименталном истраживању трења између узорка гуме и грешитних плоча, спроведеном на Машинском факултету у Нишу, забележени су случајеви у којима је коефицијент статичког трења мањи од кинетичког, што је феномен специфичан за вискоеластична тела, а овај феномен је детаљно анализиран у раду; у то, извршена је и уторерна анализа статичког трења челика на челик у различитим условима, а концепт претпостављања објашњен је у контексту вискоеластичних тела.</i>	M33
6	Милан Николић, Душан Стаменковић, Милан Банић, Investigation of friction in contact off shoe sole rubber on hard substrate, 2021., 10 th International Conference on Tribology – BALKANTRIB '20 PROCEEDINGS, странице 29-30. <i>Рад описује вискоеластична тела, попут гуме, која стварају трење на три основна начина: адхезијом, деформацијом и хабањем. Компонента трења услед адхезије директно зависи од величине стварне површине контакта. Компонента трења услед деформације може бити изазвана хистерезисном деформације површине или хистерезисом запреминске деформације. Ови феномени су проучавани у експерименталном истраживању спроведеном на Машинском факултету у Нишу. Експериментални узорци подлога су гранит, керамичка плочица и ламинат, док је вискоеластично тело гума од које се израђују ђонове обуће. У овом раду представљени је и анализа резултата експеримента.</i>	M33
7	Милан Банић, Душан Стаменковић, Милан Николић, Никола Коруповић, Design of Linear Sliding Tribometer, 2021., 10th International Conference on Tribology – BALKANTRIB '20 Proceedings, стр. 93-94.	M33

Одређивање коефицијента трења у лабораторијским условима веома је важно и корисно за разумевање триболошких процеса у контактним паровима. Машински факултет у Нишу развио је линеарни трибометар за испитивање триболошких својстава контакти између гуме и узорака подова. Основне карактеристике новог трибометра су испитивање са брзином до 400 mm/s, ходом до 600mm и мерење вредности силе трења до 200N. Уређај се састоји од електричног актуатора, волана, плоче на коју су постављени (гумени) узорци и која дефинише нормалну силу, сензори силе и различитих подних плоча за испитивање (керамичке плоче, ламинат, виши...). Основни циљ испитивања на развијеном уређају је истраживање утицаја брзине и нормалне силе, односно површине контакта на коефицијент трења између пода и обуће. Због доброг опсега брзина, могуће је испитивати допринос вискоеластичних деформација и реалне површине контакта на коефицијент трења.

Душан Стаменковић, Милан Банић, Милан Николић, Александар Милтеновић, Петар Ђекић, Influential Parameters of Footwear Slip Resistance, 2019., SERBIATRIB 2019 Proceedings, стр. 601-606.

8

Отпорност на клизање ђона обуће и површине пода је карактеристика од које зависи безбедност људског кретања. Постоје стандарди који прописују методе испитивања отпорности на клизање, али они су често критиковани и ревидирани услед идентификованих недостатака. Триболошки параметри су врло важни при ходању, трчању, скакању итд. Овај рад описује механизам трења вискоеластичних материјала на тврдом подлози. Такође, утицај неких параметара, као што су тврдоћа гуме, хистерезис гуме, услови контакта (суво и мокро) и брзина клизања, анализирају се на основу резултата експерименталних истраживања.

M33

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.



Кандидату је одобрена тема докторске дисертације. Докторска дисертација, коју је кандидат предао, је одговарајуће садржине, обима и квалитета у складу са одобреном темом. Кандидат је објавио већи број научних и стручних радова и испуњава услове за одбрану докторске дисертације.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

Поред уводног разматрања, закључка и коришћене литературе, докторска дисертација садржи још шест поглавља. Прво поглавље пружа увод у истраживање трења између обуће и подлоге, наглашавајући критичну улогу коефицијента трења у спречавању клизања и падова. Јасно су дефинисани циљеви истраживања и представљена методологија истраживања.

Друго поглавље дисертације анализира триболошке карактеристике гуме и факторе који утичу на трење у контакту обуће и подлоге. Описане су основне теорије трења, вискоеластични модели материјала, као и хистерезис гуме као карактеристика гуме од значаја за спроведена истраживања. Кандидат приказује и анализира методе за мерење коефицијента трења и хистерезиса.

У поглављу три даје се преглед досадашњих истраживања у области трибологије гуме и обуће. Разматрају се различити експериментални и нумерички приступи, као и примену вештачких неуронских мрежа за предвиђање вредности коефицијента трења, са освртом на релевантне студије и њихове резултате.

Четврто поглавље дисертације обухвата експериментална истраживања параметара гуме и подлоге који утичу на коефицијент трења између обуће и пода, као и вредности коефицијента трења при различитим вредностима тих параметара у различитим триболошким условима. Описани су методи, поступци и опрема коришћени за испитивање четири гумене смеше сличне тврдоће, али различитих вредности хистерезиса услед разлика у хемијском саставу. Експериментима су утврђене конкретне вредности тврдоће, хистерезиса и храпавости гранитних плоча. За потребе испитивања у оквиру докторске дисертације, конструисан је посебан уређај који омогућава испитивање различитих материјала и услова околине (суво, мокро, подмазано), базиран на стандарду EN 13892:2007. Током експеримента, узорци су били изложени различитим брзинама клизања (50 mm/s и 300 mm/s), као и различитим триболошким условима околине (суво, влажно, сапуница). Кандидат на крају наведеног поглавља даје и критичку анализу резултата експеримента са поређењем у односу на доступна истраживања.

У петом поглављу приказана је регресиона анализа резултата експеримента којим су одређене вредности коефицијента трења у контакту гуме и гранитних плоча. Посебан акценат је стављен на једноставну и вишеструку регресиону анализу, којом су утврђени најзначајнији фактори који утичу на вредности коефицијента трења и њихова међусобна корелација. Резултати регресионе анализе показују да регресиона анализа није у потпуности адекватна за анализу експерименталних резултата. Међутим, регресиона анализа је јасно указала да хистерезис гуме значајно утиче на њен коефицијент трења.

У шестом поглављу анализирани су резултати мерења коефицијента трења узорака гуме применом Тагучи метода. Као и у случају регресионе анализе, утврђена је утицајност појединих параметара и њихова међузависност. Анализа применом Тагучи метода је дала резултате који су у већој сагласности са експерименталним подацима у поређењу са регресионом анализом. Резултати спроведене анализе су показали да је хистерезис један од кључних фактора који утичу на вредност коефицијента трења.

Поглавље седам представља примену вештачких неуронских мрежа за предвиђање коефицијента трења између обуће и подлоге. Описани су процеси прикупљања и обраде података, као и развој модела који користи утицајне параметре који су разматрани у оквиру докторске дисертације. На основу резултата, кандидат приказује да применом неуронских мрежа можемо на адекватан начин предвидети вредности коефицијента трења.

Поглавље осам сумира најважније резултате истраживања, истичући утицај хистерезиса гуме на коефицијент трења у различитим триболошким условима. Наведени су доприноси истраживању докторске дисертације, као и предлози за будућа истраживања усмерена на унапређење безбедности и перформанси обуће.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Циљеви истраживања који су постављени у пријави докторске дисертације су потпуности остварени, у складу са предложеном темом и оквирним садржајем дисертације.

Истраживање је било усмерено на одређивање утицаја хистерезиса гуме за ђонове на коефицијент трења у контакту са подлогом. Циљ истраживања је био да се покаже како коефицијент трења зависи од хистерезиса гуме у одређеним условима контакта и да се, на основу познатих вредности хистерезиса, триболошка својства могу предвидети применом статистичких метода или алата вештачке интелигенције. У експерименту су коришћене различите гумене смеше исте тврдоће, али различитог хистерезиса.

Испитивања су обухватала мерење хистерезиса узорака на једноосној тест машини и одређивање коефицијента трења на трибометру развијеном за ову сврху. Експерименти су извођени на гранитним плочама велике тврдоће како би се искључио утицај тврдоће подлоге. Разматране су различите храпавости плоча, брзине клизања и услови контакта (суво, влажно и са сапуницом).

Добијени резултати су анализирани аналитичким и нумеричким методама и утврђен је утицај хистерезиса на коефицијент трења. Такође, дефинисан је поступак за предвиђање вредности коефицијента трења применом вештачке неуронске мреже, узимајући у обзир хистерезис гуме и друге триболошке параметре.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Научни допринос ове докторске дисертације огледа се у следећем:

- Утврђивање утицаја хистерезиса на трење - по први пут је детаљно истражен утицај хистерезиса гуме на коефицијент трења у контакту обуће и подлоге, чиме се доприноси и бољем разумевању триболошких својстава вискоеластичних материјала.
- Развој експерименталне методологије - конструисан је специјални трибометар, омогућавајући одређивање трења у различитим условима (различите брзине клизања, храпавост површина, услови контакта).
- Примена вештачке интелигенције - развијен је модел заснован на вештачким неуронским мрежама за предвиђање коефицијента трења на основу хистерезиса гуме и других триболошких параметара.
- Практична примена - резултати могу послужити као основ за унапређење стандарда и развој безбеднијих гумених материјала и противклизних подлога.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

У току научно-истраживачког рада, током израде докторске дисертације, кандидат је показао да поседује висок ниво самосталности, инвентивности и систематичности. Кроз способност сагледавања проблема коефицијента трења између обуће и подлоге и свеобухватне анализе долази до решења различитих захтева истраживања на оригиналан и креативан начин.

На основу истраживања и остварених резултата може се закључити да кандидат поседује адекватна теоријска и практична знања из различитих области која су потребна за израду докторске дисертације. Неки од научних резултата, који су представљени у докторској дисертацији, су приказани у оквиру научних радова, који су објављени у научним часописима и зборницима међународних конференција.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу свега изложеног, имајући у виду остварене научне резултате кандидата, значај као и актуелност обрађене теме, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације закључују да поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни и стручни допринос и са задовољством предлажу Наставно-научном већу Машинског факултета у Нишу да поднесу рад кандидата Милана Николића, дипломираног машинског инжењера, под називом:

„Прилог истраживању утицаја хистерезиса гуме на коефицијент трења клизања у контакту обуће и пода“
прихвати као докторску дисертацију, а кандидата позове на усмену јавну одбрану.

КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о именовању Комисије

820-01-1/25-32

Датум именовања Комисије

12.03.2025.

Р. бр.

Име и презиме, звање

Потпис

1.	Александар Милтеновић, ванредни професор Машинске конструкције (Научна област)	Машински факултет Ниш (Установа у којој је запослен)	председник 
2.	Милан Банић, ванредни професор Машинске конструкције (Научна област)	Машински факултет Ниш (Установа у којој је запослен)	ментор, члан 
3.	Блажа Стојановић, редовни професор Машинске конструкције и механизација (Научна област)	Факултет инжењерских наука Крагујевац (Установа у којој је запослен)	члан 
4.	Милош Симоновић, ванредни професор Аутоматско управљање и роботика (Научна област)	Машински факултет Ниш (Установа у којој је запослен)	члан 

Датум и место:

Марта 2025. године у Нишу и Крагујевцу