



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Борис Стојић

**МОДЕЛИРАЊЕ ОСЦИЛАТОРНОГ
ПОНАШАЊА ТРАКТОРСКИХ
ПНЕУМАТИКА ВЕШТАЧКИМ
НЕУРОНСКИМ МРЕЖАМА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2014.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Борис Стојић
Ментор, МН:	Проф. др Ференц Часњи
Наслов рада, НР:	Моделирање осцилаторног понашања тракторских пнеуматика вештачким неуронским мрежама
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски/Енглески
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина
Година, ГО:	2014.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	ФТН, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9 / 205 / 102 / 28 / 108 / 51 / 2
Научна област, НО:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Моторна возила
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Тракторски пнеуматици, осцилаторна побуда, краткоталасне неравнине подлоге, вештачке неуронске мреже
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	У фази развоја трактора употребом рачунарски подржаних симулација, неопходан је одговарајући модел пнеуматика. У раду је коришћењем неуронских мрежа развијен оригинални емпиријски модел геометријског нископојасног филтрирања краткоталасних неравнина подлоге које врши пнеуматик. Развој модела базиран је на сопственим експерименталним истраживањима посматраног аспекта понашања пнеуматика. Модел је интегрисан у глобални осцилаторни модел способан да опише основне аспекте динамичког понашања тракторских пнеуматика.
Датум прихватања теме, ДП:	27. 02. 2008.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Проф. др Ливија Цветићанин
	Члан: Проф. др Зора Коњовић
	Члан: Проф. др Лазар Савин
	Члан: Доц. др Драган Ружић
	Члан, ментор: Проф. др Ференц Часњи
	Потпис ментора



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed document
Contents code, CC :	PhD Thesis
Author, AU :	Boris Stojić
Mentor, MN :	PhD Ferenc Časnji
Title, TI :	Tractor tire vibration behavior modeling by using artificial neural networks
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	AP of Vojvodina
Publication year, PY :	2014
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg D. Obradovica 6, 21000 Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9 / 205 / 102 / 28 / 108 / 51 / 2
Scientific field, SF :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, SD :	Motor vehicles
Subject/Key words, S/KW :	Tractor tire, vibration excitation, short-wavelength unevenness, artificial neural networks
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	During tractor development phase in which computer aided simulations are used, it is necessary to use appropriate tire model. Original empirical model of tractor tire low-pass geometric filtering behavior on short-wavelength road unevenness was developed in this work by using neural networks. Model development is based on author's experimental investigations. Model is integrated into global vibration tire model able to describe basic aspects of tractor tire dynamic behavior.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	February 27th, 2008.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: PhD Livija Cvetičanin
	Member: PhD Zora Konjović
	Member: PhD Lazar Savin
	Member: PhD Dragan Ružić
	Member, Mentor: PhD Ferenc Časnji
	Mentor's sign

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
1.1	USLOVI UPOTREBE PNEUMATIKA POLJOPRIVREDNIH TRAKTORA.....	1
1.2	OSCILATORNE KARAKTERISTIKE TRAKTORSKIH PNEUMATIKA I NJIHOV ZNAČAJ	2
1.3	FORMULACIJA PROBLEMA	5
1.4	CILJ I SADRŽAJ ISTRAŽIVANJA.....	8
1.4.1	Postavljanje cilja rada: razvoj numerički efikasnog modela traktorskog pneumatika za neravne podloge.....	8
1.4.2	Zahtevi koje model treba da ispuni.....	9
1.4.3	Motivacija za korišćenje veštačkih neuronskih mreža za empirijsko modeliranje envelope kretanja	11
1.4.4	Ciljevi i obim istraživanja	13
1.5	STRUKTURA RADA.....	14
2.	PREGLED STANJA U RELEVANTNIM OBLASTIMA	15
2.1	UVODNE NAPOMENE	15
2.2	NAJČEŠĆE KORIŠĆENI MODELI ENVELOPE KRETANJA	15
2.3	PREGLED LITERATURE.....	20
2.3.1	Istraživanje ponašanja traktorskih pneumatika na tvrdim podlogama	20
2.3.2	Upotreba modela pneumatika u istraživanjima dinamičkog ponašanja traktora.....	22
2.3.3	Ostali radovi od značaja za predmetno istraživanje	23
2.3.4	Upotreba veštačkih neuronskih mreža u oblasti modeliranja pneumatika.....	27
3.	PRIKAZ RELEVANTNIH SVOJSTAVA PNEUMATSKOG TOČKA	29
3.1	UVODNE NAPOMENE	29
3.2	ZADACI PNEUMATIKA DRUMSKIH I VANPUTNIH VOZILA	29
3.3	OSNOVNA SVOJSTVA KOJA DEFINIŠU MEHANIČKE OSOBINE PNEUMATIKA	31
3.4	FILTRIRAJUĆA SVOJSTVA PNEUMATIKA PRI PRELASKU PREKO KRATKOTALASNIH NERAVNINA.....	31
3.4.1	Pojam efektivnog profila podloge i kvazistatičke envelope kretanja pneumatika.....	31
3.4.2	Mehanizam formiranja kvazistatičke envelope kretanja – pneumatik kao geometrijski niskopojasni filter	33
3.4.3	Jedan specijalni slučaj kvazistatičke envelope kretanja i odgovarajući geometrijski parametri.....	35
3.4.4	Upotreba kvazistatičke envelope pri razmatranju dinamičkog ponašanja pneumatika.....	37

4. PRIMENA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA ZA EMPIRIJSKO MODELIRANJE	39
4.1 UVODNE NAPOMENE	39
4.2 MATEMATIČKI MODEL VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE	39
4.2.1 Neuron kao osnovna jedinica veštačke neuronske mreže.....	40
4.2.2 Struktura veštačkih neuronskih mreža.....	41
4.2.3 Opšti principi obuke BP neuronskih mreža	42
4.2.4 Učenje sa vođenjem greške unazad.....	44
4.3 GENERALNE NAPOMENE O EMPIRIJSKIM MODELIMA ZASNOVANIM NA NEURONSKIM MREŽAMA.....	46
5. OPIS MERNOG POSTROJENJA	49
5.1 KONFIGURACIJA MERNOG POSTROJENJA.....	49
5.2 MERNO-AKVIZICIONI SISTEM.....	54
5.2.1 Kompozicija merno-akvizicionog sistema.....	54
5.2.2 Davač vertikalnog pomeranja.....	55
5.2.3 Davač uzdužnog pomeranja	55
5.2.4 Davač sile.....	56
5.2.5 Akvizicija i registrovanje mernih podataka	57
5.3 ISPITNI PNEUMATIK.....	60
6. UTVRĐIVANJE OSNOVNIH MEHANIČKIH PARAMETARA ISPITNOG PNEUMATIKA	61
6.1 UVODNA RAZMATRANJA	61
6.2 POSTUPAK MERENJA VERTIKALNOG OPTEREĆENJA I DEFLEKSIJE PNEUMATIKA	61
6.3 POSTUPAK MERENJA DUŽINE KONTAKTNE POVRŠINE	63
6.4 POSTUPAK UTVRĐIVANJA LINEARIZOVANE KRUTOSTI	64
6.5 POSTUPAK UTVRĐIVANJA LINEARIZOVANOG PRIGUŠENJA PNEUMATIKA METODOM LOGARITAMSKOG DEKREMENTA	65
6.6 PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA MERENJA	67
6.6.1 Zavisnost vertikalne sile i defleksije.....	67
6.6.2 Zavisnost između kontaktne dužine i defleksije / vertikalnog opterećenja ...	68
6.6.3 Linearizovana krutost	72
6.6.4 Linearizovano prigušenje.....	74
7. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA KVAZISTATIČKE ENVELOPE KRETANJA TRAKTORSKOG PNEUMATIKA	77
7.1 UVODNA RAZMATRANJA	77

7.2	POSTUPAK SNIMANJA KVAZISTATIČKE ENVELOPE I OBRADE MERNIH PODATAKA	78
7.3	ISTRAŽIVANJE UTICAJA EKSPLOATAACIONIH PARAMETARA PNEUMATIKA NA KVAZISTATIČKU ENVELOPU KRETANJA.....	81
7.4	ISPITIVANJE OSETLJIVOSTI PROMENE KVAZISTATIČKE ENVELOPE KRETANJA PNEUMATIKA NA PROMENU DUŽINE KONTAKTNE POVRŠINE.....	87
7.5	RAČUNSKA PROCENA FLUKTUACIJA VERTIKALNOG OPTEREĆENJA I DUŽINE KONTAKTNE POVRŠINE PNEUMATIKA PRI KRETANJU TRAKTORA NA KARAKTERISTIČNIM PODLOGAMA.....	91
7.6	PRIKUPLJANJE EMPIRIJSKIH PODATAKA U FUNKCIJI RAZVOJA MODELA	106
7.6.1	Osnove za planiranje eksperimentalnih ispitivanja	106
7.6.2	Plan izvođenja merenja	106
7.6.3	Rezultati ispitivanja	111
7.6.4	Izračunavanje merne nesigurnosti	112
7.7	PRIMENA MODELA SA RADIJALNIM I MEĐURADIJALNIM OPRUGAMA ZA PROŠIRENJE SKUPA EMPIRIJSKIH PODATAKA	114
7.7.1	Uloga fizičkog modela u prikupljanju empirijskih podataka.....	114
7.7.2	Aplikacija modela sa radijalnim i međuradijalnim oprugama	115
7.7.3	Parametrizacija modela.....	121
7.7.4	Varijacije vertikalnih opterećenja koje odgovaraju zadatim varijacijama kontaktne dužine	122
7.7.5	Validacija kvazistatičkog modela pneumatika sa radijalnim i međuradijalnim oprugama	124
7.7.6	Sprovođenje virtuelnih eksperimenata za prikupljanje dodatnih setova empirijskih podataka	126
8.	RAZVOJ I APLIKACIJA MODELA	129
8.1	DEFINISANJE STRUKTURE MODELA	129
8.1.1	Model envelope kretanja.....	129
8.1.2	Diskretno promenljiva geometrija profila podloge kao ulazni parametar modela envelope	130
8.1.3	Forma strukture modela	132
8.2	IZBOR I OSNOVNE KARAKTERISTIKE SOFTVERA ZA MANIPULACIJU VEŠTAČKIM NEURONSKIM MREŽAMA	133
8.3	ASPEKTI PRIPREME PODATAKA ZA OBUKU NEURONSKIH MREŽA..	134
8.4	UTVRĐIVANJE OSNOVA ZA RAZVOJ NEURONSKE MREŽE.....	137
8.4.1	Izbor ulazno/izlaznih veličina i osnovne strukture neuronske mreže.....	137
8.4.2	Smernice za izbor topologije mreže i načina zadavanja podataka za obuku	138

8.4.3	Postupak formiranja setova podataka za obuku neuronskih mreža.....	143
8.4.4	Izbor seta podataka za obuku i kriterijum za prekid obuke	145
8.5	OBUKA, IZBOR OPTIMALNE NEURONSKE MREŽE I VALIDACIJA MODELA	146
8.5.1	Koncept razvoja i validacije modela zasnovanih na VNM.....	146
8.5.2	Upotreba rezultata obučene mreže	148
8.5.3	Formiranje modela na bazi rezultata fizičkog eksperimenta.....	149
8.5.4	Formiranje modela na bazi rezultata virtuelnog eksperimenta	160
8.5.5	Slučaj obuke neuronske mreže za nepromenljivu geometriju prepreke	170
8.5.6	Analiza rezultata obuke neuronskih mreža	180
8.5.7	Utvrđivanje pravaca daljih istraživanja	185
8.6	APLIKACIJA MODELA – INTEGRACIJA SA MODELOM ELASTIČNE STRUKTURE.....	186
9.	ZAKLJUČAK.....	193
10.	LITERATURA	196
	PRILOG 1. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA KVAZISTATIČKOG ODZIVA PNEUMATIKA.....	202
	PRILOG 2. CD-ROM SA PRILOZIMA	205

1. UVOD

1.1 Uslovi upotrebe pneumatika poljoprivrednih traktora

U pogledu konstruktivnih i eksploatacionih karakteristika, poljoprivredni pneumatici se odlikuju određenim specifičnostima u odnosu na pneumatike drumskih vozila. Naime, u funkciji nastojanja da se zemljište zaštiti od prekomernog sabijanja, kao i zbog uslova vezanih za mogućnost realizacije adekvatnih performansi u pogledu ostvarivanja propulzivnih sila i minimizacije otpora kotrljanja usled tonjenja točka na mekim poljoprivrednim podlogama, poljoprivredni pneumatici se izvode kao niskopritisni. Da bi se u takvim uslovima ostvarila potrebna nosivost, a i radi poboljšanja prohodnosti traktora na vanputnim podlogama, konstruktivne dimenzije traktorskih pneumatika su po pravilu znatno veće nego kod pneumatika drumskih vozila. Izraženo prisustvo orebrenog dezena, neophodnog za realizaciju propulzije na mekom tlu, takođe se može okarakterisati kao specifičnost pneumatika za traktore i njima srodne samohodne mašine. Ove konstruktivne specifičnosti u najvećoj meri uslovljavaju ponašanje traktorskih pneumatika u smislu njihovog odziva na spoljne pobude u vidu sila i momenata.

Uslovi rada poljoprivrednih pneumatika mogu se posmatrati sa različitih aspekata, od kojih se kao najvažniji mogu izdvojiti:

a) Uslovi u pogledu vertikalne pobude

Traktori se, s obzirom na svoju namenu i koncepciju, u najvećoj meri kreću na vanputnim podlogama, iako je u novije vreme prisutna tendencija porasta udela učešća traktora u drumskom transportu [73]. Vanputne podloge, meke ili tvrde, karakterisane su značajnim prisustvom neravnina koje, u poređenju sa namenskim putevima za kretanje drumskih vozila, imaju znatno veće amplitude i manje prostorne talasne dužine odnosno više frekvencije. Ovakav karakter podloge predstavlja, i pri manjim brzinama, intenzivan izvor pobude prinudnih oscilacija traktora. **Visokofrekventna (u prostornom smislu) pobuda od strane podloge ističe važnost geometrijskog filtriranja neravnina podloge odnosno generisanja tzv. efektivnog mikroprofila podloge**, što predstavlja centralnu temu ovog rada te će stoga relevantni fenomeni u nastavku biti tretirani na odgovarajućem nivou.

b) Uslovi u pogledu realizacije horizontalnih sila

Traktorski pneumatici su prvenstveno namenjeni za realizaciju propulzivnih sila na mekim podlogama, često veoma visokih intenziteta (pri operacijama obrade zemljišta sa visokim intenzitetom sile otpora na radnom uređaju), što u najvećoj meri uslovljava njihove konstruktivne karakteristike. U novije vreme, međutim, zbog većih brzina koje ostvaruju savremeni traktori i povećanja njihovog učešća u javnom saobraćaju, u porastu je zastupljenost uslova kada se generišu uzdužne i bočne sile u kontaktu sa tvrdom podlogom.

c) Uslovi u pogledu brzine kretanja

U ranijem periodu maksimalne brzine kretanja poljoprivrednih traktora bile su relativno male (reda veličine ~25 km/h). Tokom vremena ove vrednosti su postepeno rasle, zajedno sa porastom uloge traktora u transportnim operacijama. Danas je ovaj trend posebno izražen, pa je uobičajena maksimalna brzina traktora dostigla 50 km/h, a u pojedinim slučajevima 60 ili čak 80 km/h ([22], [31]). S obzirom na velike mase traktora, relativno niske vrednosti eksploatacionog pritiska pneumatika i konstruktivne specifičnosti, ovaj trend porasta brzina značajno utiče na karakter uslova kojima su pneumatici izloženi u pogledu kako vertikalne tako i horizontalne dinamike. Posebno izražena specifičnost traktorskih pneumatika, koja se javlja pri većim brzinama kretanja, jeste visokofrekventna pobuda od strane orebrenog gazećeg sloja koja se dalje prenosi na vozilo i može da ima znatan negativan uticaj na njegove opšte dinamičke performanse u vertikalnom i horizontalnom pravcu.

Kada se u okviru ovog rada govori o poljoprivrednim traktorima (odnosno o njihovim pneumaticima), treba imati u vidu da oni predstavljaju karakteristične predstavnike grupe vanputnih vozila u koja takođe spadaju građevinske mašine, mehanizacija za rad u šumarstvu, druge samohodne mašine u poljoprivredi, vozila za vanputni transport i sl. Tako će se i termin "poljoprivredni pneumatik" koristiti takođe kao sinonim za velike niskopritisne pneumatike kakvi se koriste kod pomenutih vozila.

1.2 Oscilatorne karakteristike traktorskih pneumatika i njihov značaj

Uticaj pneumatika na opšte karakteristike vozila ispoljava se u različitim vidovima. Jedan od svakako najvažnijih je uticaj na dinamičke performanse vozila kao što su mogućnost realizacije vučnih sila, karakteristike kočenja, upravljivost i stabilnost, komfor vožnje itd. Kao što je uobičajeno u literaturi koja se bavi problematikom dinamike vozila, svojstva pneumatika relevantna za ovo područje mogu se posmatrati u pravcima prostornog koordinatnog sistema prema dejstvu sila i pomeranja, odnosno pravcu njihovog uticaja na kretanje vozila. Prema ovom pristupu, razlikuju se dinamički aspekti ponašanja pneumatika u:

- vertikalnom,
- uzdužnom, i
- bočnom pravcu.

Pri tome je izražen i međusobni uticaj pojedinih aspekata: postoji međusobna zavisnost između performansi pneumatika u uzdužnom i bočnom pravcu, a obe grupe karakteristika uslovljene su ponašanjem u vertikalnom pravcu. Koji od pomenutih aspekata i u kojoj meri dolazi do izražaja u odnosu na preostale, zavisi od vozila, načina njegovog kretanja po podlozi, kao i same podloge. Kod pneumatika drumskih vozila, koja se kreću pretežno po tvrdim podlogama relativno glatkog mikroprofila, dominantan je uticaj horizontalnih karakteristika, dok ponašanje pneumatika u vertikalnom pravcu dolazi do izražaja u manjoj meri. Nasuprot ovom slučaju, kod vanputnih vozila, gde je izražena oscilatorna pobuda od

strane izraženijih neravnina podloge, karakteristike pneumatika u vertikalnom pravcu imaju mnogo značajniju ulogu.

Elastična struktura pneumatika može se posmatrati kao sistem koji oscilatornu pobudu podloge prenosi na vozilo, menjajući je pri tome u određenoj meri u skladu sa sopstvenim karakteristikama (prenosnom funkcijom). Ove karakteristike određene su elastičnim i prigušnim svojstvima pneumatika, kao i karakteristikama filtriranja mikroprofila podloge. Ova svojstva pneumatika, dalje, proističu iz njihove strukture, geometrije i materijala od kojih su izrađeni. Kao osnovni faktori koji determinišu oscilatorno ponašanje pneumatika mogu se navesti (prema [33], [38], [45]) :

- kompleksna geometrija
- velike deformacije
- mehanička svojstva kompozitne strukture
- anizotropnost
- viskoelastičnost gume, itd.

Kada se pneumatik kotrlja po neravnom terenu kod koga je prostorna talasna dužina neravnina po redu veličine približno jednaka ili manja od dužine kontaktne površine pneumatika i tla, dolazi do lokalnih deformacija koje, s obzirom na nabrojane uticajne faktore, u značajnoj meri utiču na odziv pneumatika. Pneumatik se tada, zahvaljujući svom obliku, dimenzijama i deformabilnosti, ponaša kao niskopojasni geometrijski filter. Posledica toga je da se oblik trajektorije centra točka u takvim uslovima razlikuje od geometrijskog oblika stvarnog mikroprofila podloge. Kako oscilatornu pobudu vozila predstavlja pomeranje centra točka u vremenu, to je pobuda vozila karakterisana frekventnim spektrom različitim u odnosu na frekventni spektar podloge po kojoj se točak kotrlja. Zbog toga su mehanizmi na osnovu kojih pneumatik transformiše stvarni geometrijski profil podloge u efektivnu oscilatornu pobudu vozila suštinski važni za dinamičko ponašanje vozila.

Značaj oscilatornih karakteristika pneumatika ispoljava se sa nekoliko tačaka gledišta, što je opisano u nastavku.

a) Uticaj na komfor vožnje

Negativan karakter uticaja izloženosti čoveka vibracijama poznat je od ranije. Ovaj problem prisutan je u određenoj meri kod svih vrsta vozila, ali je kod poljoprivrednih traktora, očekivano, on znatno izraženiji nego kod drumskih vozila [72]. Izlaganje rukovaoca traktora neadekvatnom nivou oscilacija može drastično ugroziti komfor i uslove rada. Pored direktnog negativnog uticaja na čoveka, ovo može rezultirati i padom kvaliteta ili efikasnosti u obavljanju agrotehničkih operacija. Osim toga, prekomerno izlaganje vibracijama u dužem vremenskom periodu dovesti i do trajnog narušavanja zdravlja [95].

b) Uticaj na upravljivost i stabilnost vozila

Vertikalna dinamika direktno utiče na mogućnost ostvarivanja sila u horizontalnom pravcu. Oscilatorne karakteristike pneumatika utiču, naime, na fluktuaciju vertikalnog opterećenja točka. Pri toj pojavi, usled degresivnog karaktera uticaja vertikalnog opterećenja na raspoloživu horizontalnu silu, kao i zbog nestacionarnih i dinamičkih procesa pri uspostavljanju horizontalnih sila, dolazi do smanjenja srednje vrednosti raspoložive bočne sile na točku u odnosu na veličinu koja odgovara numeričkoj srednjoj vrednosti vertikalnog opterećenja u stacionarnom stanju [55] [73] [92]. odnosno bočne sile

potrebne za održavanje pravca vozila pri radu na bočnom nagibu ili pri kosom dejstvu rezultujuće sile otpora. U ekstremnim uslovima, gubitak kontakta između točka i podloge usled intenzivnih fluktuacija vertikalnog opterećenja može dovesti i do potpunog gubitka kontrole nad vozilom [31].

c) Uticaj na kočne performanse

Mehanizam smanjenja raspoložive horizontalne reakcije između točka i podloge usled fluktuacija vertikalne reakcije, gore opisan za slučaj bočne sile, važi na isti način i za uzdužne sile. Stoga dinamička pobuda u vertikalnom pravcu može, u kritičnim situacijama, negativno uticati na kočne performanse, smanjujući raspoloživu kočnu silu [56]. Zajedno sa prethodno opisanim uticajem na upravljivost i stabilnost, može se zaključiti da vertikalne oscilacije vozila odnosno pneumatika mogu imati značajan negativan uticaj na bezbednost vožnje.

d) Uticaj na prohodnost

U literaturi nešto ređe tretiran, ali ipak moguć slučaj ograničenja prohodnosti u vanputnim uslovima može nastati usled teškoća u realizaciji potrebne propulzivne sile zbog gore opisanog mehanizma gubitka kontakta pogonskog pneumatika i podloge pri vertikalnoj oscilatornoj pobudi [29]. Vanputni uslovi kretanja vozila su često povezani i sa lošijim uslovima prijanjanja između pneumatika i podloge, što može u dodatnoj meri istaći ovaj problem. Pojavu navedenog problema realno je očekivati pre svega pri značajnijim otporima kretanja vozila, npr. usled otpora na radnom uređaju ili pri kretanju na usponu. Uticaj pneumatika na prohodnost može se, takođe, posmatrati kroz mogućnost savlađivanja singularnih prepreka relativno velikih dimenzija na kakve se tipično može naići u vanputnim uslovima.

U ovakvom slučaju, doduše, vozilo se po pravilu kreće veoma malim brzinama pa je ovde pravilnije govoriti o kvazistatičkom filtriranju geometrije profila podloge nego o oscilatornoj pobudi. Problem uticaja oscilatorne pobude na smanjenje prohodnosti može se, na kraju, indirektno povezati i sa smanjenjem transportnog kapaciteta zbog ograničenja brzine koje na određenoj podlozi nameće potreba za održavanjem minimalno prihvatljivog nivoa komfora narušavanju komfora, povezano sa prvom tačkom [96].

e) Uticaj na dinamičko opterećenje konstrukcije, pouzdanost i vek trajanja elemenata

Elementi vozila kao što su osovine, ležajevi, elementi sistema oslanjanja, elementi noseće konstrukcije itd. direktno su izloženi dinamičkim opterećenjima nastalim pri kretanju vozila, koja između ostalog neposredno zavise od karakteristika pneumatika. Pored toga, pojedini elementi, kruto pričvršćeni za karoseriju vozila (hidraulični agregati, električni ili elektronski uređaji itd.) pobuđuju se na vibracije koje su delom posledica pobude neravne podloge prenete preko pneumatika. Ovi vidovi pobude izazivaju u pomenutim elementima dinamička opterećenja karakterisana određenim amplitudnim i frekventnim spektrima. Ova karakteristična opterećenja moraju biti razmatrana pri dimenzionisanju komponenata kako bi se obezbedio zahtevani nivo njihove pouzdanosti i životnog veka [10] [12] [39].

f) Uticaj odsustva sistema elastičnog olanjanja

Pored navedenih aspekata značajnosti oscilatornih karakteristika pneumatika, bitno je imati u vidu da poljoprivredni traktori u dominantnom procentu još uvek predstavljaju vozila sa krutim oslanjanjem. Naime, kod vozila koja poseduju sistem elastičnog oslanjanja, sveukupne dinamičke performanse definisane su ne samo svojstvima

pneumatika, već, u podjednakoj meri, i spektrom karakteristika ovog sistema. Kod vozila sa krutim oslanjanjem, međutim, pneumatici u potpunosti preuzimaju ulogu definisanja dinamičkih svojstava vozila, što se podjednako odnosi na svojstva ublažavanja udarnih opterećenja izazvanih geometrijom podloge i prigušivanja oscilacija, i na karakteristike upravljivosti i stabilnosti traktora. Ova činjenica, kod ove kategorije vozila, u još većoj meri ističe značaj razmatranih karakteristika pneumatika.

1.3 Formulacija problema

Poboljšanja sveukupnih vožno-dinamičkih karakteristika traktora neophodna u funkciji realizacije trenda povećanja brzina kretanja, ali i poboljšanja uslova rada rukovaoca traktora i sveukupnog podizanja kvaliteta i efikasnosti obavljanja agrotehničkih operacija. Ova poboljšanja ostvaruju se konstruktivnim unapređenjima postojećih kao i uvođenjem i razvojem novih sistema od značaja za vožne karakteristike. Ovde između ostalog spadaju elastično i nezavisno oslanjanje, oslanjanje kabine, aktivno upravljani sistemi za redukciju oscilacija itd. [11] [71] [73]. Aktuelna istraživanja, međutim, pokazuju da se pri upotrebi traktora u agrotehničkim operacijama, uprkos navedenim unapređenjima, po pravilu javlja visoka izloženost rukovaoca vibracijama, čak i veća u odnosu na regulativu vezanu za zaštitu na radu koja se bavi ovom oblašću [72]. Iako su danas traktori uglavnom opremljeni oslonjenim sedištima odnosno kabinama, praksa pokazuje da je usklađenost oscilatornih parametara često nedovoljna pa se oscilatorna pobuda ne prigušuje uvek dovoljno, a u nekim slučajevima čak dolazi i do njenog pojačanja [31].

Navedeni trendovi i problemi upućuju na zaključak da je neophodno posvetiti povećanu pažnju razvoju traktora i njihovih komponenata odgovornih za dinamičke performanse. U današnjim uslovima, upotreba računarski podržanih simulacija u projektovanju i razvoju je od suštinskog značaja za ostvarivanje zadovoljavajućih rezultata u prihvatljivim finansijskim i vremenskim okvirima. Stoga zahtev za konstruktivnim unapređenjem traktora predstavlja istovremeno i zahtev za razvojem i unapređenjem računarski podržanih modela i simulacija koje se koriste u okviru njihovog razvoja.

Simulacije predstavljaju jedan od segmenata računarski podržanog inženjeringa, koji je nerazdvojivo povezan sa razvojem svih savremenih industrijskih proizvoda, pa tako i poljoprivrednih traktora i njihovih komponenata. Sprovedenjem simulacija upotrebom odgovarajućeg softverskog okruženja zamenjuje se stvarno testiranje realnog prototipa. Upotreba računarski podržanih simulacija omogućava da se još u ranoj fazi razvoja vozila detektuju moguće neželjene forme vozila i da se na osnovu toga odgovarajućim izmenama konstruktivnih parametara modela otklone njihovi uzroci. Takođe se vrše razni vidovi optimizacija u pogledu geometrije, materijala itd. Osim znatne uštede u vremenu razvoja i materijalnim sredstvima, ovaj pristup dovodi i do poboljšanja sveukupnog kvaliteta razvoja i inženjerskog procesa [38].

Osnovni preduslov da rezultati bilo koje simulacije budu verodostojni a samim tim i praktično upotrebljivi, jeste da se u simulaciji koriste modeli pojedinih elemenata i sistema koji su u mogućnosti da, u okviru zadatih uslova, sa zadovoljavajućom tačnošću predvide tj. opišu njihovo ponašanje. Izbor vrste modela za neki element ili sistem zavisi pre svega od konteksta u kom će model biti korišćen. Pri korišćenju računarski podržane simulacije za predviđanje dinamičkog ponašanja vozila, posebno mesto zauzima potreba za raspolaganjem adekvatnim modelom pneumatika. Ovo s jedne strane proizilazi iz velikog

uticaja koji pneumatik ima za dinamiku vozila, što se mora reflektovati i na računarski model odnosno simulaciju. S druge strane, pri modeliranju se suočavamo sa kompleksnošću ponašanja samog pneumatika koju treba sa zadovoljavajućom tačnošću opisati uz prihvatljiv nivo složenosti odnosno zadovoljavajuću brzinu izvršavanja modela. S obzirom na veoma kompleksno ponašanje pneumatika i na veoma širok spektar formi u kojima se njegovo ponašanje ispoljava (oscilatorne karakteristike, prijanjanje, otpor korljanja, akustika itd.), nije svrsishodno težiti realizaciji modela koji će biti u mogućnosti da opiše sve potojeće aspekte. Umesto toga, postoji veliki broj različitih pristupa u modeliranju pneumatika koji se odnose na pojedinačne aspekte njegovog ponašanja, koji su od interesa u datom kontekstu.

Ukoliko je fokus istraživanja na samom pneumatiku, kao što je npr. slučaj pri njegovom razvoju, tada je potreban detaljan i sveobuhvatan model koji može da obuhvati što veći broj aspekata njegovog ponašanja. Ovi modeli su, međutim, zbog fizičke prirode pneumatika veoma kompleksni i zahtevaju srazmerno dugo vreme za neophodna izračunavanja na računaru.

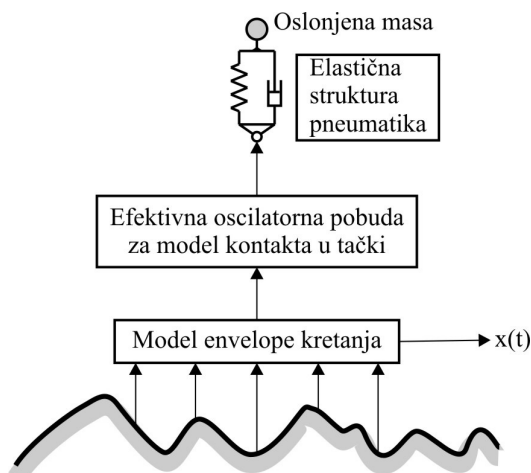
Postoje, međutim, brojni slučajevi korišćenja simulacija u kojima je upotreba detaljnog modela pneumatika manje prihvatljiva, pre svega iz razloga dugačkog vremena neophodnog za izvršavanje numeričkih operacija kod takvog modela. Ovakvi slučajevi javljaju se, na primer, kada je u centru pažnje izučavanje dinamičkog ponašanja vozila ili nekog njegovog sklopa ili podsistema relevantnog za dinamiku, analiza ili razvoj komponentata automatskog upravljanja ili njihovih upravljačkih algoritama, i sl. U ovim situacijama od modela se traži što veća brzina izvršenja pri ostvarivanju potrebne tačnosti, a često postoji i zahtev za izvršenje u realnom vremenu ili brže. Korišćenje detaljnog modela pneumatika u takvim slučajevima, međutim, nije ni neophodno, jer su potrebne informacije o samo onim parametrima ponašanja pneumatika koji utiču na posmatrane aspekte dinamike vozila. Zbog toga se u ovom slučaju teži što je moguće jednostavnijem modelu pneumatika, da bi se na taj način ostvarila veća brzina izvršavanja. Ipak, mogućnosti za pojednostavljenje modela su ograničene osnovnim zahtevom da ne dođe do ugrožavanja tačnosti sa kojom model opisuje ponašanje stvarnog sistema. U ovom slučaju važi opšte pravilo, često primenjivano u raznim oblastima inženjerstva pa i šire, da model mora da bude onoliko jednostavan koliko je moguće, i onoliko složen koliko je potrebno.

Pri modeliranju oscilatornog ponašanja pneumatika, da bi se u skladu sa navedenim zahtevima složenost modela svela na što je moguće manju meru, njegova elastičnost u radijalnom pravcu često se modelira paralelnom vezom opruge i prigušnog elementa, ili kombinacijom određenog (manjeg¹) broja ovakvih elemenata. Koliko god da je jednostavnost ovakvog modela u suprotnosti sa kompleksnom formom stvarnog pneumatika, njegova primena u mnogim oblastima daje sasvim zadovoljavajuće rezultate. Kod ovakvog pristupa, predstavljanje kontakta između pneumatika i podloge na osnovu prirode modela je ograničeno na kontakt u jednoj tački. Kada se posmatra kretanje vozila po relativno glatkim podlogama, karakterisanim isključivo neravninama čije su talasne dužine znatno veće od dužine kontaktne površine pneumatika, tada je ovakva, znatno pojednostavljena, interpretacija kontakta između pneumatika i podloge adekvatna sa aspekta tačnosti predviđanja odziva pneumatika.

¹ Postoje i modeli kod kojih se koristi veći broj radijalno raspoređenih elastičnih odnosno prigušnih elemenata, ali se oni po pravilu odlikuju neophodnošću velikog broja iteracija zbog čega se ne uklapaju u nastojanje za realizacijom što veće brzine izvršavanja.

Kada se, međutim, pneumatik kotrlja po izrazito neravnoj podlozi sa kratkotalasnim i udarnim preprekama, model sa kontaktom u tački nije u stanju da adekvatno interpretira filtriranje stvarnog mikroprofila do kojeg dolazi usled lokalnih deformacija kontaktne površine. Zbog toga se, ukoliko pri modeliranju postoji potreba za razmatranjem ovakvih uslova, mora usvojiti adekvatan pristup za otklanjanje pomenutog nedostatka. Jedno potencijalno rešenje je da se jednostavan model strukture pneumatika zameni kompleksnijim, približnijim njegovoj stvarnoj fizičkoj strukturi, koji je u stanju da opiše pojave vezane za nastanak lokalnih deformacija pri kotrljanju pneumatika po izraženo neravnoj podlozi i njihove prateće posledice. U tom slučaju, poboljšanje performansi modela sa aspekta širine spektra primene za cenu ima produženo vreme izvršavanja simulacije. Ovo svojstvo ga sa druge strane, kako je objašnjeno, za određene aspekte upotrebe može učiniti neprikladnim.

Ukoliko je, međutim, neophodno udovoljiti zahtevima za brzinom odnosno jednostavnošću modela, tada je neophodno pronaći alternativni pristup u modeliranju. Kao praktično alternativno rešenje pomenutog problema, često se usvaja pristup "razdvajanja" modela pneumatika na komponente od kojih jedna opisuje elastičnu strukturu a druga svojstva geometrijskog filtriranja podloge (tzv. *model envelope kretanja* ili *efektivni mikroprofil*, o čemu će biti reči u daljem toku rada, tačka 3.4) [10] [21] [29] [74] [98]. Model elastične strukture tada može zadržati svoju izvornu jednostavnu formu, dok se za model envelope kretanja može, u funkciji jednostavnosti, usvojiti empirijski (model "crne kutije") pristup. Na ovom mestu se još jednom podvlači da su karakteristike na osnovu kojih pneumatik filtrira stvarni profil podloge veoma kompleksne, što obrazlaže motivaciju da se pri izboru odgovarajućeg pristupa u modeliranju, u funkciji jednostavnosti modela odnosno brzine izvršavanja, prednost da empirijskom modeliranju u odnosu na analitičko. Koncept razdvajanja modela pneumatika na model kontakta sa neravnom površinom (model envelope kretanja) i model elastične strukture šematski je prikazan na slici 1. Treba napomenuti da forma odnosno složenost modela elastične strukture može varirati u relativno širokim granicama, od najjednostavnijeg kakav je prikazan na slici pa do znatno složenijih, u zavisnosti od postavljenih zahteva i predviđene oblasti primene.



Slika 1. Šematski prikaz koncepta modeliranja pneumatika sa razdvajanjem modela na model envelope kretanja (model kontakta sa neravnom podlogom) i model elastične strukture pneumatika

S obzirom na to da je razmatranje uslova kretanja po izrazito neravnim vanputnim podlogama prioritetno pri razvoju traktora, u svetlu obrazložene potrebe za unapređenjem modela i simulacija na tom području nameće se zaključak da je u dinamičkim simulacijama kretanja traktora veoma svrsishodno raspolagati modelom pneumatika koji, uz zadovoljavajuću brzinu izvršavanja, raspolaže sposobnošću za opisivanje svojstava filtriranja geometrije stvarnog profila podloge.

Pregledom raspoloživih bibliografskih izvora utvrđeno je, međutim, sledeće:

- U dosadašnjem periodu ovim problemom se bavio relativno mali broj istraživača, usled čega se predložene tehnike modeliranja javljaju u ograničenom broju;
- Postojeća istraživanja i na njima bazirani empirijski modeli envelope kretanja u u najvećoj meri bazirani na izučavanju pneumatika drumskih vozila, dok su traktorski zastupljeni u mnogo manjoj meri; otvoreno je pitanje da li je upotreba modela razvijenih za pneumatike drumskih vozila prikladna za modeliranje traktorskih, ili su, usled nabrojanih konstruktivnih razlika i specifičnosti, moguća odstupanja u formama ponašanja [31] [39] [73];
- Neke od korišćenih tehnika empirijskog modeliranja envelope kretanja pneumatika su usko povezane sa upotrebom visoko komercijalnih modela pneumatika drumskih vozila, u koju svrhu su i razvijene (npr. [55] [74] [98]), što ograničava njihovu dostupnost i primenljivost u uobičajenim naučno-istraživačkim uslovima.

U svetlu svih navedenih činjenica može se zaključiti da postoji ne samo upražnjen prostor već i jasno definisana potreba za razvojem empirijskog modela envelope kretanja traktorskog pneumatika kao elementa neophodnog za modeliranje oscilatornih karakteristika pneumatika pri kretanju u za njega uobičajenim uslovima, tj. na izrazito neravnim vanputnim podlogama.

1.4 Cilj i sadržaj istraživanja

1.4.1 POSTAVLJANJE CILJA RADA: RAZVOJ NUMERIČKI EFIKASNOG MODELA TRAKTORSKOG PNEUMATIKA ZA NERAVNE PODLOGE

U prethodnom izlaganju obrazložena je potreba za razvojem numerički efikasnog² modela traktorskog pneumatika za simulaciju kretanja traktora po podlogama sa izraženim kratkotalasnim neravninama. Jedan od istaknutih problema pri modeliranju pneumatika u slučajevima kada se teži razvoju numerički efikasnog modela jeste razvoj adekvatnog načina modeliranja envelope kretanja. Cilj ovog rada je da se razvije numerički efikasan model envelope kretanja i da se isti inkorporira u sveukupni model pneumatika koji, pored modela envelope, obuhvata i neki od odranije poznatih i uobičajeno korišćenih modela elastične strukture.

² Pod pojmom "numerička efikasnost" misli se pre svega na brzinu izvršavanja, ali i na jednostavnost parametrizacije i implementacije modela

Kao dodatni cilj može se postaviti detaljnije eksperimentalno izučavanje mehanizma kvazistatičkog kotrljanja traktorskog točka preko kratkotalasnih neravnina i prikupljanje relevantnih empirijskih podataka, s obzirom na to da je gore ukazano na potrebu za ovakvim istraživanjima.

Oblast upotrebe ovako koncipiranog modela pneumatika je njegovo korišćenje u okviru računarski podržanih simulacija dinamike kretanja traktora po izrazito neravnim podlogama u funkciji određivanja i izučavanja pokazatelja kao što su:

- kinematički parametri vertikalnih oscilacija traktora u vremenskom domenu;
- karakter oscilacija traktora i izloženosti rukovaoca njihovom uticaju;
- intenzitet i fluktuacije vertikalne reakcije između točka i podloge i njen uticaj na performanse horizontalne dinamike (kočenje, vođenje vozila po željenoj trajektoriji, savladavanje otpora kretanja) u vremenskom domenu;
- kolektiv opterećenja za dimenzionisanje nosećih elemenata traktora;
- uticaj aktivnih sistema za redukciju oscilacija odnosno upravljanje dinamikom kretanja traktora, itd.

1.4.2 ZAHTEVI KOJE MODEL TREBA DA ISPUNI

S obzirom na predviđenu oblast primene, model treba da u što većoj meri ispuni zahteve sažete u sledeće [39] [74]:

- što tačnije predviđanje odziva pneumatika pri vertikalnoj pobudi na izrazito neravnom terenu, u smislu sila odnosno pomeranja koja se preko pneumatika prenose na vozilo, u oblasti relevantnih eksploatacionih uslova;
- modeliranje u vremenskom domenu, prema mogućnosti sa izvršavanjem u okviru realnog vremena ili brže;
- redukcija tehničkih i materijalnih zahteva vezanih za postupak parametrizacije;
- uzimanje u obzir uticaja promenljivih eksploatacionih parametara pneumatika (uticaj fluktuacija vertikalnog opterećenja na karakteristike kontakta sa neravnim podlogom tokom kretanja) na njegov odziv u smislu posmatranih fenomena;
- obuhvatanje slučajeva kretanja po karakterističnim ispitnim podlogama kakve se koriste pri eksploatacionim ispitivanjima oscilatornih karakteristika traktora i njihovih pneumatika, kao i po realnim neravnim podlogama.

Zahtev za velikom brzinom izvršavanja dolazi do izražaja posebno u slučajevima kada se simulacija kretanja vozila koristi za razvoj komponenata aktivnih sistema za upravljanje dinamičkim parametrima vozila odnosno razvoj upravljačkih algoritama [39] [55] [62]. Ovaj aspekt primene modela, pored zahteva za realnim vremenom izvršavanja, takođe, iziskuje dobijanje rezultata simulacije u vremenskom domenu. Poznavanje odziva u vremenskom domenu je, osim u navedenom slučaju, takođe neophodno pri upotrebi simulacije za određivanje kolektiva opterećenja konstruktivnih elemenata [10] [39], kad god do izražaja dolazi nelinearni karakter sopstvenih ili prinudnih oscilacija kojima je posmatrani element izložen.

Nastojanje da se broj parametara modela što više ograniči proističe iz teškoća vezanih za parametrizaciju modela pneumatika, što u brojnim slučajevima predstavlja jedan od ključnih problema pri upotrebi modela [31] [39] [75]. Određivanje parametara je samo po sebi složen postupak koji po pravilu zahteva vrlo specifična merenja, koja, opet, zahtevaju specifičnu ispitnu infrastrukturu. Nabavka, održavanje i upotreba odgovarajuće infrastrukture je, dalje, po pravilu povezana sa visokim materijalnim troškovima, što ograničava njenu raspoloživost. Ovo posebno važi za pneumatike komercijalnih vozila, a pogotovo traktorske, zbog velikih dimenzija i visokog intenziteta eksploatacionih opterećenja prema kojima komponente ispitnog postrojenja treba da budu dimenzionisane. Dodatni problem je što parametrizacija nije univerzalni postupak, odnosno, i pri neznatnim konstruktivnim izmenama određenog pneumatika postupak određivanja parametara mora se u celini ponoviti. Stoga je, pored nastojanja da se model definiše ograničenim brojem parametara, opravdano težiti i pojednostavljenju postupaka ispitivanja pneumatika neophodnih za njihovo određivanje.

Zahtev za ograničenjem broja stepeni slobode je direktno povezan sa zahtevom za brzinom izvršavanja. Takođe, može se smatrati opravdanim i očekivanje da broj stepeni slobode modela pneumatika sam po sebi ne dovede do neproporcionalnog povećanja sveukupnog broja stepeni slobode modela sistema krutih tela u okviru kog se koristi [74].

Zahtevi za tačnošću predviđanja i za mogućnošću uzimanja u obzir uticaja promenljivih eksploatacionih parametara se mogu smatrati sami po sebi razumljivim. Ispunjenje ovih zahteva je preduslov validnosti modela odnosno relevantnosti dobijenih rezultata.

Izbor relevantnih eksploatacionih parametara

Pri razmatranju oscilatorne pobude od strane neravnina podloge, što je problematika koja se tretira u okviru ovog istraživanja, relevantni eksploatacioni parametri pneumatika u opštem slučaju mogu biti:

- pritisak,
- vertikalno opterećenje,
- brzina kretanja i
- geometrijske karakteristike oblika profila podloge.

Sa stanovišta envelope kretanja, pritisak i vertikalno opterećenje odnosno njemu proporcionalna radijalna defleksija pneumatika, imaju suštinski važnu ulogu jer direktno utiču na one karakteristike pneumatika od kojih zavise lokalne deformacije pri prelasku preko kratkotalasnih neravnina a time i na karakter geometrijskog filtriranja profila podloge. Dijapazon vrednosti pritiska i vertikalnih opterećenja obuhvaćenih modelom treba svakako da obuhvati minimalno one vrednosti koje se očekivano pojavljuju u eksploataciji. Postupak određivanja ovih vrednosti predstavlja deo sprovedenih istraživanja pa je detaljniji prikaz ove problematike dat u okviru odgovarajućeg poglavlja rada.

Pri razmatranju geometrijskih karakteristika oblika profila podloge po kojima se vozilo kreće postoje dva slučaja koja, kako je istraživanje pokazalo, zahtevaju različite pristupe u načinu saopštavanja vrednosti na ulazu modela envelope:

- slučaj singularno promenljive geometrije odnosno postavljanje prepreka pravougaonog ili srodnog poprečnog preseka na horizontalnu podlogu; ovakve

podloge se koriste pri tipskim ispitivanjima oscilatornih karakteristika traktora i traktorskih pneumatika, npr. ISO test staza [11] [72] i dr.

- slučaj kontinualno promenljive prostorne geometrije, što pretežno odgovara realnim vanputnim podlogama; u prethodnim istraživanjima [89] [74] je pokazano da je, usled relativno velike širine kontaktne površine, relevantna geometrija neravnina ne samo u uzdužnom već i u poprečnom pravcu; ova činjenica dovodi do ideje da se validnost rezultata simulacija kretanja vozila po neravnim terenima može poboljšati 3D reprezentacijom podloge [25].

S obzirom na to da se u predmetnom istraživanju posmatra kretanje traktora po veoma neravnim podlogama, može se smatrati da su vrednosti brzine kretanja u takvim uslovima relativno male, u svakom slučaju dovoljno male da ne dolazi do pobuđivanja interne dinamike odnosno pojave sopstvenih formi glavnih oscilacija oboda pneumatika. Stoga će u daljem radu biti usvojena pretpostavka da promena brzine kretanja u posmatranim uslovima nema relevantnog uticaja na formu envelope kretanja pri ostalim uslovima držanim na konstantnom nivou, pa neće ni biti tretirana kao ulazni parametar modela envelope. Ovom prilikom korisno je, međutim, napomenuti da brzina kretanja svakako ima uticaj na envelope, ali samo kroz uticaj na promene tekućih vrednosti vertikalnog opterećenja točka usled fluktuacija, čiji karakter svakako jeste uslovljen brzinom (što, kako je rečeno, utiče na mehanizam filtriranja stvarnog profila podloge).

Što se tiče uticaja brzine na drugu komponentu modela pneumatika, model elastične strukture, u brojnim ranijim istraživanjima je pokazan uticaj brzine kretanja odnosno frekvencije pobude na elastična i prigušna svojstva pneumatika, npr. [45] [78] i dr. Uprkos tome, u mnogim publikacijama je zanemaren uticaj brzine na krutost i prigušenje, npr. [3] [21] [29]. Ovo je opravdano kad god je u posmatranom slučaju interval brzina kretanja takav da unutar njega ne dolazi do značajnih izmena ovih osobina elastične strukture. U ovom radu se ova pretpostavka takođe može smatrati prihvatljivom. Sa druge strane, s obzirom na to da je centralna tema ovog rada razvoj modela envelope kretanja, a da će za opis ponašanja elastične strukture biti korišćen neki od postojećih pristupa, opravdano je usvojiti neki od jednostavnijih modela kako bi puna pažnja u istraživanju analizi rezultata mogla biti posvećena onoj temi koja je od centralnog interesa.

1.4.3 MOTIVACIJA ZA KORIŠĆENJE VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA ZA EMPIRIJSKO MODELIRANJE ENVELOPE KRETANJA

Envelope kretanja traktorskog pneumatika definiše sadejstvo većeg broja faktora kompleksne prirode, kao što su geometrijske nelinearnosti, nelinearnost i specifični efekti u ponašanju materijala, anizotropnost kompozitne strukture, kompleksni uslovi kontakta itd. U slučaju modela envelope kretanja zasnovanog na analitičkom razmatranju kontakta između pneumatika i podloge ne postoji mogućnost ispunjenja zahteva za numeričkom efikasnošću modela. U radu [39] iz 2008. godine navodi se da je za simulaciju prelaska pojedinačnog pneumatika preko udarne prepreke, koja u realnosti traje 0,5 sekundi, uz korišćenje detaljnog modela pneumatika zasnovanog na konačnim elementima računaru sa 4 procesora za sprovođenje numeričkih operacija bilo potrebno 15 sati rada. Na osnovu ovih činjenica jasno je da zahtev za numeričkom efikasnošću za posmatranu problematiku može biti ispunjen samo primenom empirijskog pristupa. Jedna od glavnih karakteristika empirijskog modeliranja je upravo numerička efikasnost [6].

U ovom istraživanju je ispitana mogućnost i adekvatnost primene veštačkih neuronskih mreža kao empirijskog pristupa modeliranju envelope kretanja, što predstavlja osnovnu hipotezu rada. Osnovne osobine modela zasnovanih na veštačkim neuronskim mrežama, zbog kojih se može očekivati efikasnost ovog pristupa u svetlu ispunjavanja gore navedenih zahteva, su između ostalog sledeće:

- Pogodnost za modeliranje kompleksnih i nelinearnih formi ponašanja

Veštačke neuronske mreže po svojoj prirodi predstavljaju sisteme za paralelno procesiranje podataka koje odlikuje visok stepen fleksibilnosti u pogledu forme zavisnosti između ulaznih i izlaznih veličina. Pod pretpostavkom adekvatnog izbora topologije i parametara neuronske mreže, pomoću njih je moguće modelirati praktično proizvoljne relacije između ulaza i izlaza. Ovo njihovo svojstvo ih, između ostalog, čini posebno interesantnim za modeliranje složenih relacija koje predstavljaju posledicu kompleksnih fizičkih fenomena u kakve spada i kontakt pneumatika sa neravnom podlogom.

- Mala osetljivost na šum u ulaznim podacima

Način obrade podataka u neuronskim mrežama koji podrazumeva paralelni prenos ulaznih informacija kroz veći broj jedinica za procesiranje dovodi do svojstva da se relacije između ulaza i izlaza reprezentovane pomoću veštačkih neuronskih mreža odlikuju malom osetljivošću na prisustvo šuma i rasipanja u ulaznim podacima. Empirijski podaci za formiranje modela dobijeni eksperimentalnim ispitivanjima envelope kretanja traktorskih pneumatika odlikuju se приметnim uticajima stohastičkog karaktera koji predstavljaju posledicu geometrijske i strukturne neuniformnosti, uticaja položaja rebara, nekih specifičnih mehaničkih osobina elastomera u strukturi i dr. Ove karakteristike seta podataka predstavljaju još jedan argument u izboru veštačkih neuronskih mreža za modeliranje posmatrane relacije. Ovo svojstvo takođe pojednostavljuje postupak obrade eksperimentalnih podataka, s obzirom na to da pre predavljanja seta empirijskih podataka neuronskoj mreži nije neophodno sprovesti posebne postupke eliminacije šuma kao što su osrednjavanje, filtriranje i sl.

- Sposobnost generalizacije

Još jedno svojstvo koje se može smatrati povezanim sa prethodno navedenim jeste sposobnost neuronskih mreža da generalizuju, odnosno da daju dobra predviđanja za setove ulaznih podataka koji nisu korišćeni pri formiranju modela. Ova osobina, u opštem slučaju, čini empirijske modele zasnovane na neuronskim mrežama prikladnim za upotrebu u širem spektru posmatranih uslova nego što je to slučaj kod nekih drugih empirijskih pristupa kao što su npr. interpolacija tabelarno zadatih numeričkih podataka (tzv. "look-up" tabele) ili eksplicitne algebarske relacije. Dodatna prednost ovog svojstva je potencijalno smanjenje broja eksperimentalnih merenja neophodnih za prikupljanje empirijskih podataka, što može biti od velike koristi sa praktičnog aspekta.

- Odsustvo potrebe za parametrizacijom modela

Empirijski model fizičkog fenomena zasnovan na neuronskoj mreži ne obuhvata na eksplicitan način parametre koji određuju spektar karakteristika tog fenomena, jer model nije zasnovan na formalnim algebarskim izrazima koji bi opisivali njegovo ponašanje. Mreža, doduše, poseduje interni skup parametara koji u matematičkom smislu povezuju ulazne i izlazne relacije, ali su njihove vrednosti određene automatski tokom procesa obuke i njihove numeričke vrednosti nisu od interesa za korisnika modela s obzirom na nepostojanje njihovog fizičkog značenja. Postupak parametrizacije modela koji, kako je objašnjeno, često dovodi do problema u njegovoj primeni, kod modela zasnovanog na neuronskoj mreži nije ni potreban što znatno olakšava postupak pripreme njegove implementacije.

- Odsustvo potrebe za iterativnim izračunavanjima pri aplikaciji modela

Implementacija empirijskog modela zasnovanog na veštačkoj neuronskoj mreži po pravilu se svodi na ograničen broj algebarskih operacija pri čemu postupak postupak ne obuhvata iteracije. Ova osobina značajno doprinosi numeričkoj efikasnosti odnosno brzini izvršavanja modela.

1.4.4 CILJEVI I OBIM ISTRAŽIVANJA

Ciljevi istraživanja sprovedenih u funkciji realizacije cilja rada su:

- prikupljanje kvalitativnih informacija i kvantitativnih podataka o ponašanju traktorskog pneumatika pri prelasku preko kratkotalasnih prepreka, radi sticanja što potpunijeg uvida u karakteristike posmatrane pojave i uticajne faktore, i, istovremeno, radi obezbeđivanja empirijskih podataka za uspostavljanje modela;
- uspostavljanje modela envelope kretanja zasnovanog na veštačkoj neuronskoj mreži, što obuhvata utvrđivanje optimalnog načina zadavanja ulaznih podataka, optimalne topologije i parametara neuronske mreže i optimalni izbor seta podataka za obuku i testiranje modela;
- integracija modela envelope kretanja zasnovanog na neuronskoj mreži sa nekim od postojećih modela elastične strukture pneumatika u funkciji uspostavljanja jedinstvenog modela pneumatika, i implementacija takvog modela pneumatika u okviru prikladnog softverskog okruženja.

Kao preduslov za pristupanje sprovođenju navedenih postupaka prvobitno je izvršena priprema prikladnog eksperimentalnog okruženja, nakon čega su vršena uvodna eksperimentalna ispitivanja u funkciji određivanja osnovnih osobina elastične strukture pneumatika i preliminarnog upoznavanja sa kvazistatičkim ponašanjem traktorskog pneumatika pri kotrljanju preko singularnih kratkotalasnih neravnina.

1.5 Struktura rada

Rad je sastavljen od 9 poglavlja (uključujući zaključak), jednog priloga i CD-ROM-a sa dodatnim priložima u elektronskom formatu. Nakon uvoda u problematiku, definisanja ciljeva i njihovog obrazloženja prikazanih u okviru ovog poglavlja, u drugom poglavlju sledi pregled aktuelnog stanja na području ispitivanja i modeliranja traktorskih pneumatika što obuhvata i pregled odgovarajuće literature. Osim radova striktno vezanih za traktorske pneumatike, pregled u neophodnoj meri obuhvata i druge srodne ili bliske teme relevantne za predmetno istraživanje kao što su npr. istraživanja pneumatika drumskih vozila, istraživanje i modeliranje vanputnih podloga i dr. U okviru ovog poglavlja prikazan je i pregled radova iz oblasti upotrebe veštačkih neuronskih mreža za modeliranje ponašanja pneumatika drumskih i vanputnih vozila.

Treće poglavlje se bavi prikazom relevantnih fenomena koji se javljaju pri kotrljanju pneumatskog točka. Iz veoma širokog spektra fizičkih pojava koje karakterišu ovaj proces izdvojene su pre svega one koje su od suštinskog značaja u posmatranom kontekstu. Uloga ovih razmatranja je da se, nakon prvobitnih informacija prezentovanih u uvodnom poglavlju, još detaljnije ukaže na značaj tretirane problematike kao i da se navedu relevantni fizički fenomeni čija složenost opravdava usvajanje empirijskog pristupa modeliranju. U okviru ovog poglavlja takođe su date definicije i objašnjenja pojmova korišćenih u daljem toku rada.

U četvrtom poglavlju prikazane su teorijske osnove veštačkih neuronskih mreža sa posebnim osvrtom na njihovu primenu za empirijsko modeliranje.

U petom poglavlju je dat prikaz mernog postrojenja, a u šestom opis postupka utvrđivanja osnovnih mehaničkih parametara pneumatika uz prikaz i diskusiju dobijenih rezultata.

Tema sedmog poglavlje su kvalitativna i kvantitativna istraživanja kvazistatičke envelope traktorskog pneumatika, uključujući prikupljanje empirijskih podataka za formiranje modela.

Ključni deo rada predstavlja osmo poglavlje koje se bavi razvojem, validacijom i principima implementacije modela. Zaključci istraživanja formulisani su u devetom poglavlju.

U funkciji potpunijeg prikaza i uvida u primenjene postupke i rezultate pojedinih faza istraživanja, struktura rada dopunjena je odgovarajućim priložima.

2. PREGLED STANJA U RELEVANTNIM OBLASTIMA

2.1 Uvodne napomene

U okviru pregleda stanja dosadašnjih istraživanja i njihovih rezultata, pažnja je posvećena radovima koji su u neposrednoj ili bliskoj vezi sa temom ovog istraživanja. U tom kontekstu pregled obuhvata, pored istraživanja i modeliranja envelope kretanja na koje je fokusiran, takođe i neke druge teme koje se mogu, u većoj ili manjoj meri, smatrati srodnim odnosno relevantnim za tretiranu problematiku. Pod ovim se podrazumevaju opšti problemi ponašanja pneumatika – posebno traktorskih – na čvrstoj podlozi, zatim dinamika i oscilatorne karakteristike traktora i vanputnih vozila, istraživanje i modeliranje parametara neravnih podloga, upotreba modela pneumatika u okviru računarski podržanih simulacija dinamike vozila, i sl.

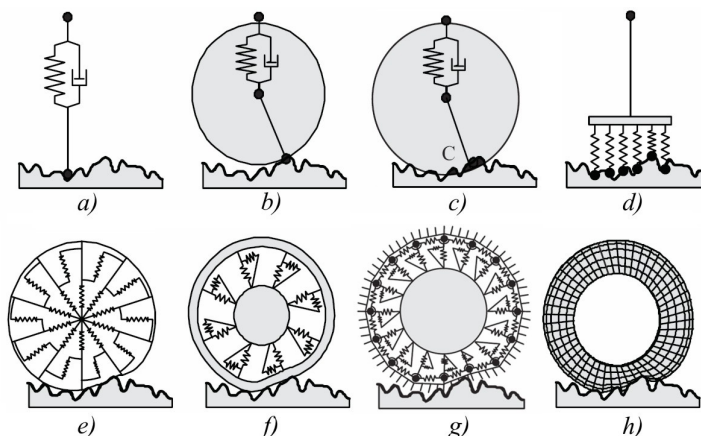
Iako se istraživanje bavi traktorskim pneumaticima, datim pregledom stanja su u značajnoj meri obuhvaćeni i radovi vezani za pneumatike drumskih vozila. Naime, iako se na osnovu nekih konstruktivnih i eksploatacionih karakteristika pneumatici drumskih vozila i veliki niskopritisni pneumatici poljoprivrednih traktora značajno razlikuju, postoji takođe i niz zajedničkih osobina i sličnih formi ponašanja u sličnim uslovima eksploatacije. Ovo dovodi do toga da su postupci ispitivanja i modeliranja za ove dve grupe pneumatika u brojnim slučajevima isti ili slični. Stoga su, pored nastojanja da ovaj pregled bude u najvećoj meri fokusiran na traktorske pneumatike, razmatrani i oni slučajevi i rezultati izučavanja pneumatika drumskih vozila koji svojim sadržajem doprinose uspostavljanju i unapređenju odgovarajuće baze znanja na području traktorskih pneumatika.

Na osnovu obrazloženja navedenog u tački 3.1, radovi koji se traktorskim pneumaticima bave sa aspekta kretanja po mekim podlogama nisu razmatrani u okviru ovog pregleda. Iscrpan pregled literature sa stanovišta teramehanike može se naći npr. u [73], [80] i dr.

2.2 Najčešće korišćeni modeli envelope kretanja

U prvom delu pregleda stanja navedeni su najpoznatiji opšti pristupi u modeliranju envelope kretanja. Prikaz je baziran na referencama [3] [10] [36] [74] [98]. Na slici 2 šematski su prikazani najčešće korišćeni pristupi u modeliranju kontakta pneumatika sa izrazito neravnom podlogom, odnosno envelope kretanja. Posmatrani modeli su zasnovani na pretpostavkama o fizičkoj strukturi pneumatika, pri čemu se njena stvarna forma reprezentuje počevši od krajnje pojednostavljenog do veoma kompleksnog i detaljnog modela. Kratak opis i karakteristike pojedinih pristupa dati su u nastavku. Podvlači se da primarna svrha poslednja 3 modela (slika 2 f, g i h) značajno prevazilazi samo modeliranje kontakta sa neravnom podlogom, s obzirom na to da su ovi modeli u mogućnosti da obuhvate veći broj fenomena uključujući internu dinamiku pneumatika odnosno sopstvene

forme glavnih oscilacija i druge dinamičke karakteristike. Ipak, s obzirom na njihovu sposobnost da validno prikažu kotrljanje pneumatika preko kratkotalasnih neravnina, mogu se između ostalog koristiti i za izučavanje odnosno modeliranje envelope kretanja pa su stoga obuhvaćeni prikazom.



*Slika 2. Pregled najčešće korišćenih pristupa u modeliranju envelope kretanja zasnovanim na pretpostavkama o fizičkoj strukturi pneumatika, prema [74]:
 a) kontakt u tački, b) valjkasti kontakt, c) kontakt na bazi istisnute zapremine,
 d) konstantna kontaktna dužina sa diskretizovanim kontaktima, e) model sa radijalnim i međuradijalnim oprugama, f) elastični prsten, g) sistem koncentrisanih masa / krutih tela, h) MKE model*

Kontakt u tački

Ovo je najjednostavniji i ujedno u oblasti dinamike drumskih vozila najčešće korišćeni pristup. Geometrijski oblik stvarnog mikroprofila se, transformisan u vremenski domen, prenosi kao oscilatorna pobuda na elastičnu strukturu u posmatranom primeru modeliranu preko paralelne veze elastičnog i prigušnog elementa. Model je validan na glatkim podlogama karakterisanim isključivo neravninama čije su talasne dužine znatno veće u odnosu na dužinu kontaktne površine, usled čega nema značajnog uticaja lokalnih deformacija i pratećih efekata. Stoga se u posmatranim uslovima postižu dobri rezultati kako u pogledu tačnosti tako i, zahvaljujući jednostavnosti, numeričke efikasnosti. Ove osobine su pre svega doprinele masovnoj upotrebi ove vrste modela kada to uslovi predmetnog problema omogućavaju. Sa druge strane model, u opštem slučaju, nije pogodan za opisivanje oscilatorne pobude od strane kratkotalasnih neravnina.

Valjkasti kontakt

Unapređenje u odnosu na prethodno posmatrani model u tački ogleda se u uvođenju krutog točka koji je u kontaktu sa singularnom tačkom neravne podloge. Na taj način položaj kontaktne tačke u odnosu na elastičnu strukturu pneumatika je promenljiv u uzdužnom pravcu. Na taj način se vrši određen vid geometrijskog filtriranja neravnina čime se generiše određena forma efektivnog mikroprofila. Model daje zadovoljavajuće rezultate za neravnine malih dimenzija.

Kontakt na bazi istisnute zapremine

Kod ovog modela, radijalna reakcija je proporcionalna veličini istisnute zapremine odnosno, u slučaju ravanskog modela, površini preseka između točka sa slobodnim radijusom i neravne podloge. Pristup je validan za podloge čija geometrija nije karakterisana suviše oštrim i naglim prelazima.

Konstantna kontaktna dužina sa diskretizovanim kontaktima

Model se zasniva na reprezentaciji kontaktne površine nepromenljive dužine određenim brojem elastičnih (i eventualno prigušnih) elemenata u kontaktu sa podlogom u singularnim tačkama. Ovaj model kontakta ujedno na znatno pojednostavljen način reprezentuje i elastičnu strukturu. Iako predstavljaju unapređenje u odnosu na neke od prethodno prikazanih pristupa, model se odlikuje ograničenim stepenom tačnosti jer ne uzima u obzir geometrijske efekte u zoni kontakta.

Model sa radijalnim i međuradijalnim oprugama

Ovaj model, u svojoj bazičnoj formi, sastoji se samo od radijalnih opruga. Poboljšanje u odnosu na prethodni model predstavlja uzimanje u obzir uticaja geometrije strukture pneumatika. Nedostatak ovog koncepta je nedostatak uzimanja u obzir savojne krutosti gazećeg sloja, zbog čega su uvedene i međuradijalne opruge kojima se obuhvata ovaj efekat. Kao i kod svakog modela zasnovanog na diskretizaciji kontinualne strukture, tačnost rezultata zavisi od stepena diskretizacije. S obzirom na to da se ravnotežni položaj modela određuje iterativnim postupkom, porast gustine mreže diskretnih elemenata neophodan za poboljšanje kvaliteta dobijenih rezultata dovodi do značajnog porasta vremena potrebnog za izvršavanje. Uzimanje u obzir nelinearnih efekata u dodatnoj meri potencira navedene efekte. Pojedine varijante ovog modela su koncipirane tako da krutosti radijalnih elastičnih elemenata dodaju i zasebnu pneumatsku komponentu koja učestvuje u generisanju vertikalne reakcije, čime se model dodatno unapređuje sa aspekta reprezentacije strukture stvarnog pneumatika.

Elastični prsten

Model strukture pneumatika obuhvata elastični prsten i diskretne radijalno - tangencijalne elastične elemente koji prsten spajaju sa krutim naplatkom. Postoje verzije sa stišljivim i nestišljivim prstenom, koji može biti modeliran analitički kao kontinualna struktura, pomoću metoda konačnih elemenata, kombinacijom MKE i sistema krutih tela ili kao torusna membrana. Zahvaljujući savojnoj krutosti prstena, radijalna krutost strukture je veća na ivicama nego u sredini kontaktne zone. I bez uzimanja u obzir nelinearnih efekata u ponašanju materijala, model je u mogućnosti da u kvalitativnom smislu u potpunosti opiše kotrljanje točka preko singularnih prepreka. Prvenstvena namena modela je, doduše, analiza pojava u kojima do izražaja dolazi interna dinamika pneumatika.

Sistem koncentrisanih masa / krutih tela

Kod ovog modela se koriste principi dinamike sistema krutih tela, koja su predstavljena određenim brojem koncentrisanih masa međusobno povezanim aksijalnim odnosno torzionim elastičnim i prigušnim elementima. Obod pneumatika diskretizovan je putem ravanskog ili prostornog sistema koncentrisanih masa. Masa boka pneumatika se može zanemariti. Diskretne mase na obodu povezane su putem elastičnih i prigušnih elemenata sa krutim naplatkom u središtu. Pomoću torzionih elastičnih elemenata modeliraju se efekti savojne krutosti. Horizontalni kontakt gazećeg sloja sa podlogom se modelira nizom diskretnih lakih elastičnih elemenata u frikcionom kontaktu sa podlogom (tzv. "brush"-model).

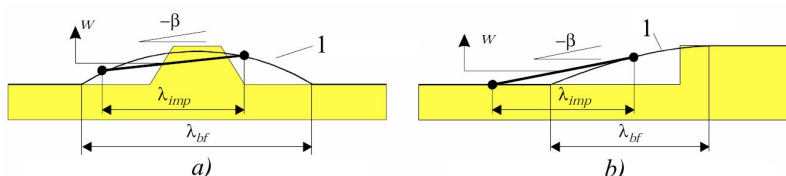
Model zasnovan na metodu konačnih elemenata

MKE-modeli pneumatika predstavljaju najdetaljniju i najverniju reprezentaciju realne strukture pneumatika. U prethodnom delu izlaganja, međutim, već je obrazloženo da ovaj pristup nije adekvatan u simulacijama dinamike vozila kada se posmatra vertikalna pobuda od strane neravne podloge odnosno dinamičke performanse u uzdužnom i bočnom pravcu. Takođe, tačnost koja se postiže njihovom primenom u opštem slučaju nije veća od tačnosti prethodne dve vrste modela (elastični prsten i sistem krutih tela). Stoga je, u kontekstu navedenih oblasti dinamike vozila, MKE model pneumatika najinteresantniji kao izvor za parametrizaciju prethodnih grupa modela umesto eksperimentalnih ispitivanja realnog pneumatika. Ovom prilikom takođe treba podsetiti na nezamenljivost ovog pristupa u nekim drugim područjima aplikacije, kao što su npr. vibroakustika, razvoj samog pneumatika i dr. Iako je jasno da nema svrhe razvijati MKE model pneumatika samo u funkciji modeliranja envelope kretanja, njegova primena u navedenu svrhu za slučaj njegove raspoloživosti je svrsishodna jer takođe može zameniti dugotrajna kompleksna ispitivanja uz pružanje uvida u mehanizme deformacija i naprezanja u pneumatiku do kojih tom prilikom dolazi.

Empirijski i poluempirijski modeli

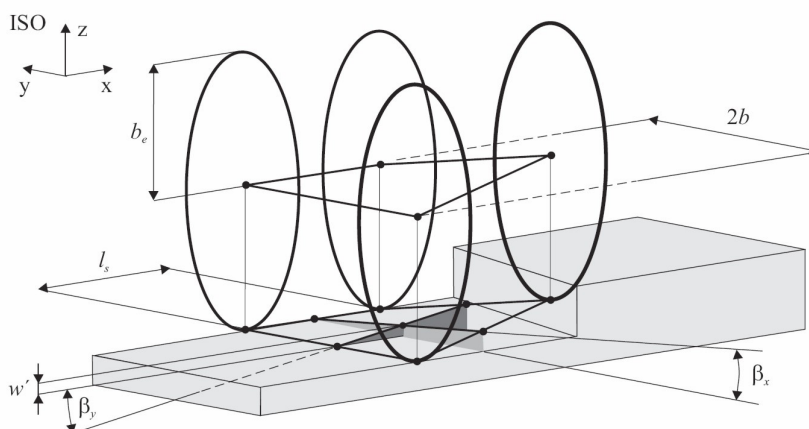
Primena jednostavnog kontaktnog modela sa dodiranjem u tački u mnogim slučajevima je svrsishodna pre svega zbog svoje jednostavnosti. Za slučaj podloga sa kratkotalasnim neravninama, upotreba modela sa kontaktom u tački je moguća ako se umesto stvarnog za vertikalnu pobudu koristi efektivni mikroprofil nastao na osnovu filtrirajućih svojstava pneumatika. Ovaj koncept podrazumeva da je odziv modela sa kontaktom u tački, kada se kao pobuda koristi efektivni mikroprofil, identičan ili veoma blizak odzivu stvarnog pneumatika kada pobudu predstavlja stvarni profil podloge [98]. Za ravanski model pneumatika, efektivni mikroprofil karakterišu efektivna visina, efektivni ugao uzdužnog nagiba i efektivni radijus kotrljanja. Za prostorni oblik profila podloge, ovim parametrima se pridružuje još i efektivni ugao bočnog nagiba podloge (slike 3 i 4). Ovaj pristup je doveo do razvoja empirijskih odnosno poluempirijskih modela envelope kretanja pneumatika koji, generišući efektivni mikroprofil u toku kretanja, omogućavaju da se za model elastične strukture koristi kontakt u tački. Time se smanjuje sveukupni stepen složenosti modela odnosno skraćuje vreme izvršavanja.

Oblik kvazistatičke envelope pri prelasku preko singularnih prepreka pravougaonog ili srodnog poprečnog preseka doveo je do koncepta tzv. baznih funkcija [5] (tačka 3.4.3, slika 10). U radu [98] razvijen je postupak za određivanje parametara efektivnog mikroprofila putem mehanizma sa dve tačke koje klize po podlozi na konstantnom uzdužnom rastojanju (slika 3), vođene duž krivih definisanih empirijskim baznim funkcijama. Primena ovog modela u praksi je ograničena na pravougaone ("step") prepreke. Model, takođe, ne uzima u obzir promene karakteristika profila podloge u poprečnom pravcu odnosno obuhvata samo ravanske efekte.



Slika 3. Ilustracija koncepta praktičnog određivanja efektivnog mikroprofila preko baznih funkcija za trapezni (a) i "step" (b) oblik profila podloge [98]: l – efektivni mikroprofil, w – efektivna visina, β – efektivni uzdužni nagib, λ_{bf} – dužina bazne funkcije, λ_{imp} – fazni pomak baznih funkcija

Radi prevazilaženja navedenih ograničenja, polazeći od pomenutog metoda, u radu [74] razvijen je unapređeni pristup koji omogućava generisanje efektivnog mikroprofila za proizvoljan prostorni oblik profila podloge. Unapređenje se zasniva na uvođenju eliptičnih kliznih bregova umesto tačaka i na prostornom rasporedu većeg broja ovakvih elemenata. Uprošćen prikaz koji omogućava bolji uvid u parametre efektivnog mikroprofila dat je na slici 4. Kod ovog modela, kao i kod prethodnog, uzimanje u obzir uticaja radnog režima pneumatika na envelope kretanja, koji se ispoljava promenom filtrirajućih svojstava zbog promene ugiba i kontaktne dužine, uzima se u obzir promenljivim rastojanjem kliznih elemenata (λ_{imp} , slika 3, odn. l_s , slika 4).



Slika 4. Parametri efektivnog mikroprofila određeni pomoću mehanizma sa eliptičnim bregovima (uprošćen prikaz) [74]: w' – efektivna visina, β_x – efektivni uzdužni nagib, β_y – efektivni bočni nagib; b , b_e , l_s – geometrijski parametri modela

Pored pomenutih pristupa koji tretiraju envelopu kretanja odnosno efektivni mikroprofil u prostornom domenu, u empirijske modele spadaju i modeli koji, koristeći svojstva pneumatika kao niskopojasnog geometrijskog filtera, problem razmatraju u frekventnom domenu [21] [29] [99]. Ovakav pristup je svrsishodan kada relevantni fenomeni ispoljavaju linearnost i kada vremenski aspekti ponašanja sistema nisu od značaja.

2.3 Pregled literature

2.3.1 ISTRAŽIVANJE PONAŠANJA TRAKTORSKIH PNEUMATIKA NA TVRDIM PODLOGAMA

Tokom 60-tih godina XX veka objavljen je jedan broj publikacija čiji predmet interesovanja predstavlja dinamičko ponašanje traktora [78], npr. [19], [40] i dr. Usled trenda porasta brzina kretanja tadašnjih traktora, početkom 70-tih godina ovoj problematici posvećena je veća pažnja što je omogućeno i tadašnjim paralelnim razvojem računarskih resursa [75]. S tim u vezi podstaknuta su i istraživanja relevantnih aspekata ponašanja traktorskih pneumatika.

Rad Sharon-a [78] iz 1975. predstavlja jednu od ranijih značajnijih publikacija vezanih za ovakva istraživanja. U radu su sprovedena sveobuhvatna istraživanja oscilatornih karakteristika velikih niskopritisnih pneumatika na tvrdim podlogama. Ispitivanja su vršena sa pneumatikom prinuđenim da osciluje u vertikalnom pravcu sa jednim stepenom slobode kao i sa pneumatikom koji se određenom brzinom kotrljao preko ispitne staze sačinjene od niza udarnih prepreka konfigurisanih tako da daju željeni frekventni spektar. Za ova dva slučaja dobijeni su različiti rezultati u pogledu elastičnih i prigušnih svojstava. U radu su opisani postupci ispitivanja i izvršena detaljna analiza uticajnih parametara koji definišu krutost i prigušenje traktorskih pneumatika. Istraživani su uticaji vertikalnog opterećenja, pritiska, konstruktivnih karakteristika i zapremine.

Tema rada Kissing-a i Göhlich-a iz 1988. [45] takođe su opširna istraživanja oscilatornih karakteristika traktorskih pneumatika na realnoj podlozi i na laboratorijskom postrojenju. Kao glavni eksploatacioni parametri pneumatika od kojih zavise elastična i prigušna svojstva posmatrani su pritisak i brzina kretanja. U radu je takođe razmatran uticaj nepravilnosti geometrije pneumatika (odstupanje kružnosti) i orebrenog profila na dinamičku pobudu vertikalnih oscilacija traktora. Rezultati su vrednovani kroz grafičke prikaze funkcionalnih zavisnosti kao i u frekventnom domenu. U radu je istaknut značaj eksperimentalnih ispitivanja traktorskih pneumatika kao način da se zaobiđu teškoće u analitičkom tretmanu proistekle iz složenih fenomena koji karakterišu njihovo ponašanje.

Langenbeck je 1993. istraživao dinamičko ponašanje traktora sa posebnim osvrtom na uticaj svojstava pneumatika [50]. Ustanovljene su nelinearne relacije za elastične i prigušne sile. Kontakt između pneumatika i podloge predstavljen je krutim lučnim segmentom čime se u određenoj meri reprezentuju feometrijska filtrirajuća svojstva. Rad Langenbecka nastavljen je u istraživanju Plessera 1997. [66] koji je ustanovio funkcionalnu zavisnost između prigušenja u pneumaticima i brzine kretanja.

Dalje unapređenje istraživanja dinamičkih karakteristika traktorskih pneumatika obuhvaćeno je radom Schlotter-a iz 2005 [73]. U odnosu na većinu dotadašnjih istraživanja u čijem fokusu su bile pretežno elastične i prigušne karakteristike pneumatika,

istraživanje Schlotter-a bavi se stacionarnim i dinamičkim odzivom u uzdužnom i bočnom pravcu, uključujući režim sa dinamički promenljivim vertikalnim opterećenjima točka. U radu se, doduše, navodi da je na Tehničkom univerzitetu u Hohenheim-u sa istraživanjima ponašanja traktorskih pneumatika u horizontalnom pravcu započeto još 1978. godine, ali je tim istraživanjima poklanjana znatno manja pažnja u odnosu na teramehaničke i oscilatorne karakteristike. Na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja izvršena je provera prikladnosti postojećih modela pneumatika, razvijenih za pneumatike drumskih vozila, za modeliranje traktorskih pneumatika. Zaključeno je da su specifičnosti ponašanja traktorskih pneumatika izražene u dovoljnoj meri da je, u funkciji sprovođenja detaljnijih analiza, opravdan razvoj modela namenjenog specijalno za traktorske pneumatike. U zaključku je takođe navedeno da složenost posmatranih fenomena iziskuje dalja eksperimentalna i teorijska istraživanja.

Ferhadbegović 2008. [31] oslanjajući se na rezultate Schlotter-a [73] i ranijih istraživanja razvija model traktorskog pneumatika sa kontaktom u tački koji opisuje ponašanje elastične strukture u sva tri pravca (*Hohenheimer Reifenmodell*). Odziv modela predstavlja svih 6 komponenta reakcije podloge redukovanih u kontaktnu tačku, odnosno po 3 komponente sile i momenta. Razvoj modela obuhvatio je i postupke parametrizacije i verifikacije. U nastavku rada razvijeni model pneumatika je apliciran u okviru modela traktora zasnovanog na sistemu krutih tela razvijenog ranije u radovima Böhlera ([14] i dr.). Nakon validacije model traktora je korišćen za kvalitativnu analizu dinamičkih performansi traktora i za studiju uticaja nekih konstruktivnih rešenja na njihovo poboljšanje.

Unapređenje Ferhadbegovićevog modela izvršio je Witzel 2011. godine [93] uvođenjem koncepta nelinearnih radijalnih i međuradijalnih opruga što model čini podesnim za uzimanje u obzir kratkotalasnih neravnina podloge. Numerička efikasnost modela ostvaruje se uvođenjem funkcije prenosa za opisivanje interakcije između radijalnih elemenata i korišćenjem korekcionog faktora linearizacije kojim se omogućava upotreba Laplasovih transformacija uprkos nelinearnosti sistema.

U radu Böhm-a iz 2005. godine [15] korišćen je nešto drugačiji pristup koji se bazira na korišćenju analitičkih relacija za opisivanje fizičkih fenomena. Model se zasniva na analitičkim jednačinama za opisivanje 3D membrane pod pritiskom sa uzimanjem u obzir nelinearnosti i anizotropnosti. U sledećem koraku vrši se diskretizacija u funkciji numeričkog rešavanja sistema jednačina. Ovakav izbor pristupa u skladu je sa ciljem postavljenim u radu, prema kome se od modela očekuju informacije o internim naponskim i deformacijskim stanjima pneumatika koje se koriste u funkciji njegovog razvoja i inženjerske analize. Model je takođe predviđen i za korišćenje u okviru dinamičkih simulacija kako traktora tako i drumskih vozila (uz potrebne modifikacije modela strukture), na tvrdim i mekim podlogama, što je u radu potkrepljeno numeričkim primerima. Takođe je razvijena redukovana 2D verzija modela sa zadatkom da omogući brže izvršavanje modela u okviru dinamičkih simulacija vozila.

U radu Schumacher-a [75] iz 2009. godine navodi se da je jedan od osnovnih problema sa kojima se suočavaju korisnici računarskog softvera za simulaciju dinamike poljoprivrednih traktora postojanje teškoća u parametrizaciji modela pneumatika. Ovaj problem posledica je pre svega skupog i kompleksnog postupka ispitivanja pneumatika koja je neophodno vršiti kako bi se odredili parametri dinamičkih modela pneumatika. S tim u vezi je i nedostatak odgovarajućih ispitnih postrojenja za ovakva ispitivanja. U brojnim slučajevima korisnici su, stoga, prinuđeni da, umesto korišćenja tačnih parametara modela pneumatika, vrše iskustvenu procenu njihovih vrednosti. Ovaj problem motivisao je autora

da primeni specifičan pristup modeliranju pneumatika. U radu je razvijen generički model pneumatika vanputnih vozila koji opisuje ponašanje pneumatika pri čemu kao ulazne veličine koristi samo podatke o dimenzijama pneumatika, vrednosti pritiska i vrsti podloge. Rad se bavi vertikalnom i horizontalnom dinamikom pneumatika, sa težištem na ovoj prvoj. Navodi se da su odstupanja modelirane radijalne krutosti dobijeni primenom modela za različite pneumatike u poređenju sa izmerenim vrednostima u granicama od 10%, dok za prigušenje rasipanje iznosi oko 20%. Verifikacija modela je izvršena na osnovu merenja odgovarajućih parametara pri voznim manevrima realnih vozila.

Tema istraživanja Ebel-a iz 2006. [27] je raspodela kontaktnog pritiska pneumatika za šumarstvo na tvrdim i mekim podlogama. Iako nije direktno vezan za dinamiku, rad se između ostalog bavi istraživanjem određenih aspekata ponašanja elastične strukture pneumatika u uslovima statičkog opterećenja. Ovim putem dobijaju se informacije o pneumatiku koje mogu biti od značaja za istraživanje i modeliranje dinamičkog ponašanja ili kontakta sa neravnom podlogom (npr. parametrizacija modela sa radijalnim i međuradnim oprugama i dr.). U radu je dat sveobuhvatni prikaz traktorskih pneumatika sa stanovišta klasifikacije, sistematizacije, označavanja, strukture, oblasti primene itd. Koristan za praksu može biti i popis proizvođača i produkata raspoloživih na tržištu objavljen u radu.

2.3.2 UPOTREBA MODELA PNEUMATIKA U ISTRAŽIVANJIMA DINAMIČKOG PONAŠANJA TRAKTORA

Jedan od glavnih zadataka pri istraživanju i modeliranju ponašanja traktorskih pneumatika je upotreba dobijenih rezultata u analizi dinamičkog ponašanja traktora. U nastavku je pomenut jedan broj karakterističnih radova iz ove oblasti.

Časnji [21] je 1984. godine izvršio razvoj, modeliranje i evaluaciju ogibljenog traktorskog sedišta sa inercijalnim prigušivačem oscilacija. U radu je opisan postupak ispitivanja realnog traktora u funkciji određivanja parametara modela vozila za simulaciju kretanja po neravnim podlogama. Modeliranje filtrirajućih svojstava pneumatika pri kretanju po kratkotalasnim neravninama je izvršeno u frekventnom domenu, pomoću empirijske funkcije za modifikaciju gustine spektra snage neravnina podloge prema [99].

U radu Bernd-a iz 2001. godine [11] ispitivan je uticaj različitih parametara na oscilatorne karakteristike pasivno elastično oslonjene traktorske kabine. Prikazani su pristupi za vrednovanje dinamičkog ponašanja traktora sa aspekta upravljivosti i komfora vožnje. U radu je koncipiran i evaluiran sistem za pasivno oslanjanje kabine. Virtuelni eksperimenti u funkciji prikupljanja informacija vršeni su metodom sistema krutih tela uz korišćenje odgovarajućeg dinamičkog modela traktora čija je validacija izvršena u okviru istraživanja. Za pobudu modela u simulaciji je korišćena podloga stohastičkih karakteristika profila sintetisanog inverznom Furijeovom transformacijom. Pri tome su koristeći funkciju koherence prema [2] generisani zasebni tragovi za levu i desnu stranu vozila. Postupak identifikacije oscilatornih parametara pneumatika oslanja se na rezultate istraživanja Kissing-a i Göhlich-a [45].

U radu Ahmed-a i Goupillon-a iz 1997. [1] razvijen je analitički model za predviđanje oscilatorne pobude koja se prenosi na sedišta vozača traktora pri kretanju preko neravne podloge traktora sa elastično oslonjenom kabinom i sedištem. U radu se ističe da glavnu motivaciju za temu istraživanja predstavljaju teškoće u izolaciji rukovaoca traktora od ove vrste oscilatorne pobude. Oscilatorni model je sastavljen od modela pneumatika,

oslanjanja kabine i oslanjanja sedišta sa uzimanjem u obzir nelinearnih karakteristika. Filtriranje neravnina podloge uzeto je u obzir metodom valjkastog kontakta. Validacija je izvršena poređenjem sa eksperimentalnim merenjima oscilatornih parametara traktora pri kretanju preko standardizovane neravne ispitne podloge definisane standardom ISO-5008.

U radu Böhler-a iz 1999. [14] godine opisan je dinamički model traktora zasnovan na sistemu krutih tela. U simulaciji je usvojeno da se traktor kreće po podlozi sa kratkotalasnim neravninama opisanoj pomoću funkcije gustine spektra snage i vrednosti njenih parametara. Svojstva geometrijskog filtriranja ovih neravnina od strane pneumatika opisana su jednostavnim osrednjavanjem visine mikroprofila po dužini kontaktne površine. Model traktora je korišćen za prikupljanje informacija o kolektivu dinamičkih opterećenja nosećih elemenata.

Rad Sarami-ja [71] iz 2009. bavi se razvojem aktivnog sistema oslanjanja traktora sa elastičnim oslanjanjem prednje i zadnje osovine. U funkciji eksperimentalnih ispitivanja izvršena je odgovarajuća modifikacija traktora MB Trac 1600 mase 6,3 t. Radom je obuhvaćena studija oscilatornih karakteristika vozila sa posebnim osvrtom na traktore. Razmotren je uticaj pneumatika kao i drugih komponenata na oscilatorne karakteristike traktora. Autor zaključuje da je kod savremenih traktora koje odlikuje veća brzina kretanja, s obzirom na karakteristike pneumatika, bez sistema elastičnog oslanjanja nemoguće adekvatno odgovoriti na zahteve komfora i bezbednosti vožnje. U okviru istraživanja razvijen je prototip traktora sa aktivnim oslanjanjem, što je uključilo razvoj i izradu potrebnih komponenata i njihovu ugradnju na ispitni traktor. Na osnovu rezultata ispitivanja razvijen je i validiran model traktora u programu Matlab/Simulink. Ispitivanja realnog traktora vršena su saopštavanjem oscilatorne pobude preko četiri nezavisna hidropulzatora na koje su oslonjeni točkovi traktora. Površina kontakta točka sa nosećim pločama hidropulzatora je ravna, pa je za model pneumatika izabrano najjednostavnije rešenje odnosno model sa kontaktom u tački i paralelnom vezom elastičnog i prigušnog elementa, oba linearne prirode. Evaluacijom karakteristika razvijenog sistema aktivnog oslanjanja ustanovljena je redukcija RMS ubrzanja karoserije traktora za približno 10% u svim posmatranim slučajevima (translacione oscilacije u vertikalnom pravcu i ugaone oscilacije oko uzdužne i poprečne ose).

Cutini i Bisaglia su 2011. godine u radu [20] objavili rezultate realnog eksperimentalnog ispitivanja elastičnog oslanjanja traktorske kabine. Ispitivanje je vršeno pomoću uređaja sa 4 hidropulzatora za saopštavanje vertikalne oscilatorne pobude direktno na pneumatike traktora. Ispitivan je traktor mase 5020 kg. Studija je potvrdila potrebu za daljim istraživanjima osobina elastomernih oslonaca u funkciji poboljšanja stepena smanjenja izloženosti traktoriste vibracijama. U okviru ovog istraživanja nije vršeno zasebno razmatranje uticaja pneumatika s obzirom na to da su oni uzeti u obzir kao integralni deo oscilatornog sistema nad kojim je sprovedeno eksperimentalno ispitivanje.

2.3.3 OSTALI RADOVI OD ZNAČAJA ZA PREDMETNO ISTRAŽIVANJE

Iako prema zaključcima pojedinih istraživanja (između ostalih npr. Schlottera [73] i Ferhadbegovića [31]) opravdanost upotrebe modela zasnovanih na istraživanjima pneumatika drumskih vozila za opisivanje traktorskih pneumatika može biti dovedena u pitanje, oni se ponekad ipak koriste u ove svrhe, npr. [14]. Ovakav pristup je u nekim slučajevima neophodan u nedostatku alternativnog rešenja, zbog ograničene raspoloživosti specifičnih rešenja za traktorske pneumatike. Kao još važnije ističe se da neki od ovih

modela i njihova upotreba, kao i sama eksperimentalna istraživanja iz kojih su proistekli, predstavljaju suštinski doprinos globalnim aspektima proučavanja dinamike pneumatika i dinamike vozila. Iz tog razloga najznačajniji od njih biće takođe ukratko pomenuti. Pored radova neposredno vezanih za proučavanje i modeliranje samog pneumatika, planirano je da ovaj deo pregleda literature obuhvati i pojedine radove kod kojih u žiži interesovanja leže dinamičke performanse vozila na neravnim podlogama, kao i sve druge teme koje mogu biti od značaja za istraživanje kojim se ovaj rad bavi.

Jedan od najznačajnijih i najčešće navođenih modela je tzv. MF (*Magic Formula*) koji je razvio Pacejka sa saradnicima. Osnovna verzija modela opisana je u radu [4]. Model se zasniva na empirijskim matematičkim funkcijama koje opisuju veličine bitne za horizontalnu dinamiku vozila u stacionarnom režimu kretanja. Matematičke relacije sadrže određen broj parametara za čije određivanje je neophodno sprovesti određena eksperimentalna ispitivanja. Model je tokom narednog perioda doživeo brojne modifikacije i usavršavanja. U radu Zegelaar-a iz 1998. [98] razvijen je model elastične strukture zasnovan na krutom prstenu povezanom sa krutim naplatkom preko vertikalnog, uzdužnog i rotacionog Voigt-Kelvinovog elementa (elastični i prigušni element u paralelnoj vezi). Za modeliranje uzdužnih sila u kontaktu sa podlogom koristi se MF-model. Mehanizam generisanja mikroprofila zasnovan na principu baznih funkcija i sistemu praćenja profila podloge u dve tačke na fiksnom rastojanju, pomenut u prethodnom delu prikaza (slika 3), takođe je razvijen u okviru ovog rada i predstavlja deo modela. Model može da predvidi odziv pneumatika pri dinamičkim varijacijama kočnog momenta i pri kotrljanju na neravnim podlogama. Jedan od važnih aspekata aplikacije modela je npr. razvoj ABS sistema. Model sa krutim prstenom, kako je već pomenuto, može da modelira internu dinamiku pneumatika na nivou sopstvene forme glavnih oscilacija u kojoj obod pneumatika osciluje radijalno u odnosu na naplatak kao kruto telo.

Rad Maurice-a iz 2000. [55] predstavlja nastavak razvoja koncepta uvođenjem bočne elastičnosti u model Zegelaar-a [98]. Model razvijen u ovom radu ima mogućnost da predvidi odziv pneumatika pri kombinovanom dejstvu uzdužnih i bočnih sila pri dinamičkim varijacijama pobude i pri kretanju na neravnoj podlozi.

Trenutni nivo razvoja modela započetog kroz radove Zegelaar-a i Maurice-a predstavlja rezultat rada Schmeitz-a iz 2004. godine [74]. U ovom radu je razvijen mehanizam generisanja efektivnog mikroprofila za proizvoljni prostorni oblik stvarne geometrije podloge, prikazan na slici 4. Radovi Zegelaar-a [98], Maurice-a [55] i Schmeitz-a [74] sprovedeni su na Tehničkom univerzitetu Delft u Holandiji u saradnji sa holandskom firmom TNO i konzorcijumom sačinjenim od većeg broja renomiranih proizvođača automobila. U okviru ovog projekta razvijen je komercijalni model pneumatika predviđen za upotrebu u simulacijama dinamike vozila pod nazivom SWIFT³.

Među rezultatima istraživanja sprovedenih na Tehničkom univerzitetu u Delftu biće pomenut još i rad Gong-a iz 1993. godine [36] u kom je razvijen model na bazi elastičnog prstena. U radu je razvijen model zasnovan na fizičkoj strukturi pneumatika, koji omogućava simulaciju ponašanja pneumatika u kompleksnim uslovima kao što je kotrljanje po podlozi sa kratkotalsnim neravninama ili pojava sopstvenih glavnih formi oscilovanja pri visokofrekventnim pobudama, pri čemu nije narušena tačnost predviđanja pri niskim frekvencijama. Model je ravanski tj. obuhvata opterećenja u uzdužnom i

³ S.W.I.F.T. = *Short Wavelength – Intermediate Frequency Tire model*, model pneumatika za kratkotalsne neravnine i prelazne frekvencije

vertikalnom pravcu odnosno momente oko poprečne ose. Težnja rada je da se težište izučavanja oscilatornih karakteristika pneumatika prebaci više na analitički pristup u odnosu na eksperimentalni. Glavna karakteristika modela je struktura koju čine tri elementa: elastični neistegljivi homogeni prsten koji predstavlja obod pneumatika, kruti centralni element koji predstavlja naplatak, i elementi koji povezuju prethodna dva, objedinjavajući funkciju elastičnog boka i vazduha pod pritiskom, a sačinjeni su od elemenata koji omogućavaju radijalna i tangencijalna elastična pomeranja. Analitičke jednačine koje čine bazu za razvoj modela takođe obuhvataju prednaprezanje elastičnih elemenata usled unutrašnjeg pritiska. Razvoj modela praćen je parametrizacijom, validacijom i studijama karakterističnih slučajeva primene. Pokazano je dobro slaganje predviđanja modela sa eksperimentalnim rezultatima.

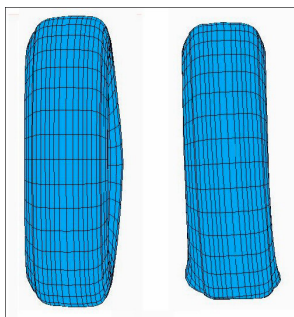
Još jedan komercijalni model za sličnu oblast primene predstavlja model pod nazivom F-TIRE [28] [34]. Model se zasniva na diskretizaciji strukture pneumatika odnosno njenoj reprezentaciji većim brojem krutih tela raspoređenih u više paralelnih ravni. Ova tela su međusobno spojena translatorskim i torzionim elastičnim i prigušnim elementima, a odlikuju se prisustvom mase što omogućava modeliranje interne dinamike uključujući veći broj sopstvenih formi glavnih oscilacija. Stepem diskretizacije takođe omogućava modeliranje kotrljanja po neravnim podlogama. Kontakt elemenata strukture sa podlogom opisan je odgovarajućim frikcionim modelom što omogućava modeliranje odziva pneumatika u uzdužnom i bočnom pravcu. Složena struktura modela iziskuje velik broj parametara, i do približno 200 [75]. Model F-TIRE je između ostalih korišćen u radu Einsle-a [28] iz 2010. Tema ovog rada je istraživanje odziva pneumatika u dinamičkim uslovima i pri ekstremnim voznim manevrima. U radu se između ostalog ukazuje na uticaj vertikalne dinamike vozila na horizontalno-dinamičke performanse. Takođe je istaknut je problem izraženog rasipanja parametara modela pneumatika dobijenih na osnovu merenja na različitim ispitnim postrojenjima (razlike kod određenih parametara iznose i do ~30%).

Sledeći komercijalni model dosta korišćen u simulacijama vozila koji se odlikuje mogućnošću opisivanja interne dinamike i obuhvatanja kratkotalasnih neravnina je RMOD-K [10] [61]. Sam princip modeliranja je sličan kao kod prethodno pomenutog modela, tj. struktura je izdvojena na veći broj koncentrisanih masa međusobno povezanih elastičnim i prigušnim elementima, tako da su i performanse modela približne prethodno navedenom. Ovaj model pneumatika korišćen je npr. pri modeliranju vozila u radu Benz-a iz 2008. [10] čija tema je primena simulacije dinamike vozila sa oscilatornom pobudom u funkciji obezbeđenja pouzdanosti noseće strukture ili komponenata kruto spojenih sa karoserijom. U ovom radu, u funkciji što potpunijeg i tačnijeg prikaza opterećenja raznih elemenata vozila, simulacija je vršena u vremenskom domenu pomoću metoda dinamike sistema krutih tela. U tu svrhu je izvršena sinteza profila podloge koji odgovara realnim stohastičkim neravninama. U radu su prikazana dva postupka sinteze realne neravne (stohastičke) podloge na osnovu karakterističnog toka funkcije gustine spektra snage. Jedan je zasnovan na inverznoj Furijeovoj transformaciji, a drugi na filtriranju belog šuma sa normalnom raspodelom amplituda. Prvi postupak je jednostavniji za primenu ali mu je nedostatak to što se kao rezultat dobija signal sa linijskim spektrom, pa autor prednost daje drugom pristupu. Dalje, sprovedeno je istraživanje granica primenljivosti računarskih simulacija u funkciji dostizanja neophodne pouzdanosti vozila. U radu je razvijen pristup za određivanje dinamičkih opterećenja komponenata pri pobudi od strane neravnina podloge putem simulacije.

Posebnu grupu modela pneumatika čine oni zasnovani na metodu konačnih elemenata (MKE). Ovi modeli su po pravilu sposobni da veoma tačno predvide ponašanje

pneumatika u širokom spektru posmatranih aspekata, ali ih zbog velikog broja stepeni slobode i složenih konstitutivnih relacija koje opisuju ponašanje materijala karakteriše veoma dugačko vreme izvršenja. Ova osobina ih u brojnim slučajevima čini neprikladnim za upotrebu u simulacijama dinamike vozila, mada ima i slučajeva u kojima je njihova upotreba nužna. Ovi modeli su takođe značajni i na području sticanja uvida u interne fenomene i detaljnije izučavanje fizike pneumatika na fundamentalnom nivou. Njihova upotreba je takođe svrsishodna i u funkciji parametrizacije jednostavnijih modela. Na ovom mestu će biti ukratko pomenuto samo nekoliko karakterističnih primera MKE modela pneumatika, bez nastojanja za davanjem detaljnog i potpunog prikaza ovog područja.

Rad Kindt-a iz 2009. [43] koristi MKE za predviđanje buke koju emituju pneumatiki, što predstavlja tipično područje primene MKE u modeliranju pneumatika. Rad je fokusiran na istraživanje emisije buke pneumatika pri prelasku preko diskontinuiteta u geometriji profila podloge. U radu Nilson-a iz 2004. godine [60] razvijeno je nekoliko novih vrsta konačnih elemenata tipa "vejvgajd" (waveguide) u funkciji poboljšanja modela pneumatika. Fraggstedt se u radu iz 2008. godine [32] bavio primenom konačnih elemenata sa prigušnim svojstvima u funkciji predviđanja otpora kotrljanja pneumatika. Rad Sabine Herkt iz 2008. godine [39] rezultat je preliminarnih razmatranja u funkciji nastojanja da se razvije model pneumatika zasnovan na MKE metodu koji bi sa stanovišta numeričke efikasnosti bio prikladan za upotrebu u dinamičkim simulacijama vozila. Erşahin je 2003. godine u radu [30] koristio model pneumatika zasnovan na MKE u funkciji predviđanja bočne reakcije kotrljajućeg pneumatika. Pri tome je pažnja posvećena redukciji potrebnog obimanumeričkog postupka. Na slici 5 prikazan je izgled MKE modela pneumatika pod uticajem bočne sile.



Slika 5. Prikaz FE modela pneumatika u kotrljanju pod uticajem bočne sile – pogled odozgo i sprede [30]

U radu Nadine Koprowski-Theiß iz 2011. godine [46] razmatrano je MKE modeliranje viskoelastičnih materijala. Iako se ova disertacija se ne bavi direktno problematikom vezanom za pneumatike niti za dinamiku vozila, ovde se navodi jer se između ostalog bavi modeliranjem Mullinovog i Payneovog efekta koje ispoljavaju elastomeri korišćeni kod pneumatika. Rad se stoga može posmatrati kao doprinos unapređenju postupaka modeliranja pneumatika metodom konačnih elemenata. U radu Chae-a iz 2006. [18] razvijen je MKE model pneumatika teretnog vozila koji je korišćen u funkciji parametrizacije modela zasnovanog na krutom prstenu. Korunović i dr. su razvili MKE model za simulaciju stacionarnog kotrljanja pneumatika na ispitnom valjku pod dejstvom bočne sile [47].

Na kraju pregleda literature biće pomenuto još nekoliko radova koji sadrže informacije od značaja za predmetni rad.

Među brojnim radovima koji su se bavili istraživanjima statističkih parametara neravnina podloge, kao izvor te vrste podataka u ovom istraživanju korišćen je rad Ronaija iz 1974. [69] čija tema je bila istraživanje statističkih parametara mikroprofila poljoprivrednih puteva i mogućnosti njihove primene za analizu i proračun oscilacija vozila sa povećanom prohodnosti.

Oueslati je u radu [62] iz 1995. godine izučavao uticaj aktivnih i pasivnih sistema oslanjanja na oscilacije tegljača. Autor ističe dugoročni uticaj ovih oscilacija na narušavanje zdravlja rukovaoca vozila i uzrokovanje oštećenja podloge odnosno robe koja se prevozi. Jedan od kriterijuma za evaluaciju sistema oslanjanja predstavljaju dinamičke reakcije između pneumatika i podloge. Podrazumevano je da se vozilo kreće po stohastičkoj podlozi karakterisanoj funkcijom gustine spektra snage neravnina. Za potrebe simulacije u vremenskom domenu, neophodne za razvoj upravljačkih algoritama aktivnog sistema oslanjanja, generisan je profil neravne podloge propuštanjem belog šuma kroz filter prvog reda.

Eiyo je 1989. godine istraživao uticaj neravnina čvrste podloge na performanse pneumatika [29]. Istraživan je efekat koji oscilatorna pobuda podloge ima na realizaciju vučnih sila i prohodnost vozila. Filtrirajući efekat pneumatika posmatran je u vremenskom domenu.

2.3.4 UPOTREBA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA U OBLASTI MODELIRANJA PNEUMATIKA

U ovoj tački dat je sažet pregled jednog broja aktuelnih naučnih radova koji tretiraju problematiku modeliranja ponašanja pneumatika motornih vozila pomoću veštačkih neuronskih mreža. Iako postoji jedan broj ovakvih radova, konstatovano je, između ostalog, da primer upotrebe neuronskih mreža za modeliranje kvazistatičke envelope kretanja pneumatika u dostupnoj literaturi nije pronađen.

Detaljan model dinamičkog ponašanja pneumatika zasnovan na BP neuronskoj mreži razvio je Barber 2004. godine [7]. Cilj rada je razvoj modela koji omogućava analize stabilnosti i upravljivosti vozila na ravnim podlogama sa visokim stepenom tačnosti. Model vrši predviđanje intenziteta svih komponenta reakcije podloge (sile i momenti za sve tri ose). Opseg predviđanja obuhvata velike vrednosti amplituda reakcija pri nestacionarnim uslovima, za ponude ranga do ~ 5 Hz. Kao ulazne veličine se koriste radijalna defleksija pneumatika, bočno povodjenje, ugao bočnog nagiba i uzdužno klizanje. Setovi podataka za obuku i validaciju neuronske mreže dobijeni su merenjima na ispitnom postrojenju pri dinamičkim varijacijama ulaznih parametara stohastičkog karaktera. U radu se ukazuje na rane primere upotrebe neuronskih mreža za modele pneumatika korišćene za bočnu dinamiku, [41] i [63].

Za realizaciju najjednostavnijeg slučaja, koji koristi samo jednu ulaznu i jednu izlaznu veličinu (ugao povodjenja i bočna sila) bilo je potrebno oko 1h računarskog rada da se generiše model. Najsloženiji slučaj (4 ulaza, 6 izlaza) zahtevao je oko 24h. U pogledu tačnosti rezultata, autor zaključuje da predloženi pristup treba da bude razmotren kao alternativa konvencionalnim metodama modeliranja posmatranih aspekata ponašanja pneumatika.

U radu [42] je neuronska mreža korišćena za modeliranje bočne sile na točku u zavisnosti od vertikalnog opterećenja, ugla povodenja, bočnog nagiba i uzdužne sile. Navodi se da rezultati modela odstupaju najviše 3% od rezultata merenja.

U radu [52] je razvijen model za predviđanje bočne sile na točku u funkciji ugla povodenja i uzdužne sile na bazi RBF neuronske mreže sa skrivenim slojem od 6 neurona. Performanse modela su upoređene sa performansama Magične formule. Rezultati su pokazali da je tačnost predviđanja neuronske mreže bila veća nego sa MF modelom.

U radu [54] je razvijena RBF neuronska mreža koja na bazi relativne brzine klizanja točka u odnosu na podlogu predviđa uzdužnu reakciju podloge.

U radu [13] je predložen model pneumatika za opisivanje ponašanja pri kombinovanom (uzdužnom i bočnom) klizanju. Model je zasnovan na neuronskoj mreži za čiju obuku se koristi rekurzivni *lazy-learning* pristup. Autori navode da se glavne prednosti ovog pristupa u odnosu na konvencionalnije postupke kao što je npr. *backpropagation* sastoje pre svega u brzini učenja, pojednostavljenom izboru strukture neuronske mreže i veća fleksibilnost. Ističe se takođe da postoje i određeni nedostaci, kao npr. potreba za obimnijim setom eksperimentalnih podataka.

3. PRIKAZ RELEVANTNIH SVOJSTAVA PNEUMATSKOG TOČKA

3.1 Uvodne napomene

Pneumatike drumskih i vanputnih vozila karakteriše širok spektar svojstava koja se po svojoj prirodi često međusobno veoma razlikuju. Razmatranje celokupnog skupa aspekata ponašanja pneumatika bilo bi stoga preobimno i značajnim delom izvan fokusa teme kojom se ovaj rad bavi. Zbog toga će u okviru prikaza najvažnijih osobina pneumatika i njihovog ponašanja pažnja biti usmerena na one aspekte koji su u neposrednoj ili bliskoj vezi sa obrađivanom temom. Ostali važniji aspekti biće, zbog značaja, ukratko pomenuti na kraju ovog poglavlja.

Kada se razmatra ponašanje pneumatika u funkciji uticaja na dinamiku vozila, jedna od glavnih podela mogućih pristupa jeste ona na izučavanje kotrljanja točka po tvrdim odnosno mekim podlogama. Ova dva pristupa predstavljaju dve odvojene celine, s obzirom na različitost ključnih fenomena i načina njihovog tretmana. Kretanje po mekim podlogama izučava se u okviru teramehanike, čija glavna polja proučavanja predstavljaju između ostalog mehanizam realizacije horizontalnih sila između točka i deformabilne podloge, uticaj pneumatika na karakteristike zemljišta nakon prolaska, prohodnost, otpor kotrljanja na mekim podlogama itd. Zbog neophodnosti uzimanja u obzir mehaničkih karakteristika meke podloge, pristup u ovoj oblasti često se potpuno razlikuje od proučavanja mehanike kotrljanja točka po krutoj podlozi. Kako se navedeni problemi teramehanike i pristupi koji se koriste pri njihovoj obradi nalaze gotovo u potpunosti van fokusa ovog rada, teramehanika i njeni pravci delovanja neće biti obuhvaćeni u okviru prikaza koji sledi.

3.2 Zadaci pneumatika drumskih i vanputnih vozila

Pri proučavanju eksploatacionih pokazatelja pneumatika, mora se krenuti od uloge pneumatika na vozilima, tj. zadacima i zahtevima čijem ispunjenju ti pokazatelji treba da se kvalitativno i kvantitativno što više približe. Glavni zadaci pneumatika u generalnom smislu, bez obzira na oblast njihove primene, jesu [95]:

- prijem vertikalnih sila usled težine vozila i inercijalnih sila pri njegovim oscilacijama;
- ublažavanje udarnih opterećenja nastalih u kontaktu točka sa neravninama podloge;
- obezbeđenje mogućnosti realizacije tangencijalne reakcije sa podlogom u funkciji realizacije pogona i kočenja, za što raznovrsnije uslove vrste i stanja podloge;

- obezbeđenje mogućnosti realizacije bočne reakcije sa podlogom u funkciji vođenja vozila po zadatoj trajektoriji i suprotstavljanja poremećajima kretanja na raznovrsnim podlogama.

Pored ovih osnovnih zadataka, postoji i skup opštih zahteva čijem se ispunjavanju takođe teži generalno, bez obzira na predviđenu aplikaciju. Kao važniji mogu se izdvojiti [53]:

- dobro suprotstavljanje habanju;
- nizak otpor kotrljanja;
- minimalna emisija buke i vibracija;
- očuvanje stalnosti dimenzija;
- visoka pouzdanost u toku očekivanog životnog veka;

Što se tiče specifičnih zahteva koje treba da ispune poljoprivredni pneumatici, isti se mogu formulisati kroz sledeće [73]:

- dobra realizacija horizontalnih (pre svega vučnih) sila u kontaktu sa mekom podlogom;
- smanjenje negativnog uticaja na poljoprivrednu podlogu izazvanog njenim sabijanjem;
- povećana otpornost na mehanička oštećenja;
- mogućnost samočišćenja, itd.

U odnosu na pneumatike drumskih vozila, može se reći da su traktorski pneumatici u ranijim periodima bili u jednoj meri izuzeti od gore navedenog zahteva za minimalnom emisijom buke i vibracija. Pod ovim se misli na period u kom su, sa jedne strane, brzine kretanja traktora bile relativno male, a sa druge, zahtevi za uslovima rada operatera nešto manje izraženi. U novije vreme, međutim, došlo je do značajnih povećanja brzina kretanja traktora sa jedne, i do povećanog nivoa zahteva za poboljšanjem ergonomije i opštih uslova rada rukovaoca traktora. Zbog toga je ovaj zahtev kod savremenih traktorskih pneumatika znatno dobio na značaju. Dalje, zbog povećanja brzina kretanja savremenih poljoprivrednih traktora i njihovog značajnijeg učešća u transportu na javnim putevima namenjenim za saobraćaj drumskih vozila, skup zahteva koji se postavljaju pred poljoprivredne pneumatike upotpunjen je zahtevima inače karakterističnim za pneumatike vozila koja se kreću po čvrstim podlogama, pre svega:

- mogućnost realizacije adekvatnih uzdužnih i bočnih sila na tvrdoj podlozi;
- dinamičke karakteristike u bočnom pravcu koje obezbeđuju dobru upravljivost i stabilnost traktora pri većim brzinama;
- redukcija emisije oscilacija i prema mogućnosti njihovo prigušivanje, s obzirom na to da većina traktora danas još uvek nije opremljena sistemom elastičnog oslanjanja.

Kao što se vidi iz nabrojanih zahteva, izbor konstruktivnih parametara današnjih poljoprivrednih pneumatika mora da doprinese ostvarivanju kompromisa između performansi pneumatika na tvrdim i mekim podlogama, koji su u određenoj meri protivrečni.

3.3 Osnovna svojstva koja definišu mehaničke osobine pneumatika

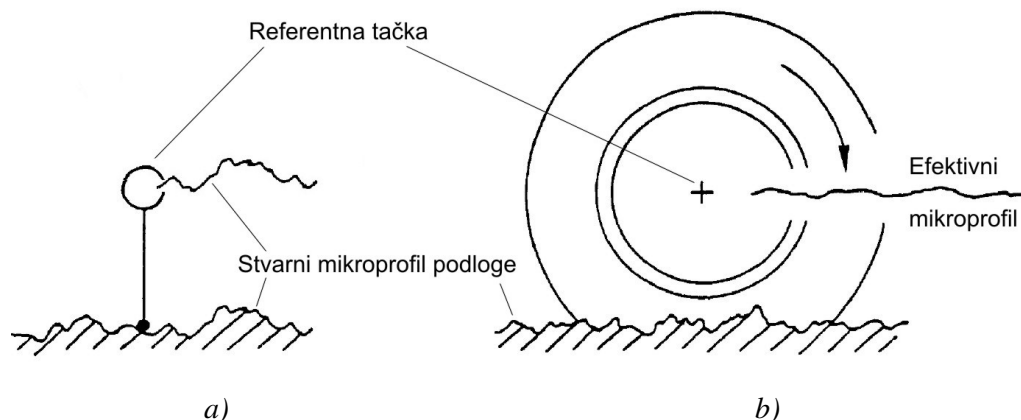
Pri izučavanju različitih aspekata ponašanja pneumatika, eksperimentalni pristup i empirijsko modeliranje često imaju značajnu ulogu. Važnost eksperimentalnog pristupa pri proučavanju pneumatika zasnovana je, između ostalog, na značajnim teškoćama koje nastaju pri analitičkom razmatranju njegovog ponašanja zasnovanog na fizičkim zakonitostima i mehanizmima koje tom prilikom dolaze do izražaja. Osnovni fenomeni koji uslovljavaju odziv pneumatika pri različitim vrstama spoljne pobude su [33] [38] [45] [53] [95]:

- velike deformacije, koje dovode do ispoljavanja nelinearnosti kako geometrijske prirode tako i u parametrima mehaničkog ponašanja materijala;
- geometrijska i konstruktivna složenost;
- anizotropnost kompozitne strukture;
- viskoelastično ponašanje elastomera.

3.4 Filtrirajuća svojstva pneumatika pri prelasku preko kratkotalasnih neravnina

3.4.1 POJAM EFEKTIVNOG PROFILA PODLOGE I KVAZISTATIČKE ENVELOPE KRETANJA PNEUMATIKA

Na slici 6 prikazano je poređenje kretanja jednog krutog mehaničkog elementa (npr. štapa prinuđenog da zadrži vertikalni položaj) koji ostvaruje kontakt sa podlogom u jednoj singularnoj tački, i elastičnog pneumatskog točka, po neravnom profilu podloge. Za referentnu tačku krutog štapa čije kretanje se posmatra izabran je njegov drugi kraj, dok referentnu tačku pneumatika predstavlja centar naplatka. Prilikom kretanja štapa duž geometrijskog profila podloge, prostorni oblik trajektorije referentne tačke identičan je formi tog profila. Kretanje referentne tačke pneumatika se, međutim, odlikuje drugačijim karakteristikama. Usled geometrijskih karakteristika i fleksibilnosti pneumatika dolazi do transformacije geometrijskog oblika profila podloge tako da se referentna tačka kreće po drugačijoj putanji. Osnovna svojstva pneumatika koja dovode do navedenog rezultata jesu formiranje konačne površine naleganja po kojoj pneumatik ostvaruje kontakt sa podlogom kao i lokalne deformacije fleksibilne strukture pneumatika koja u određenoj meri obuhvata (obavija) neravnine stvarnog mikropfila. Ovi fenomeni su detaljnije razmatrani u narednoj tački. Trajektorija referentne tačke (centra) pneumatika naziva se **efektivni mikroprofil**. Kada se posmatra vertikalna dinamika elastično oslonjene mase vozila pri kretanju po neravnoj podlozi, tada oscilatornu pobudu predstavlja efektivni mikroprofil transformisan u vremenski domen.



Slika 6. Uticaj pobude usled neravnina podloge na vertikalno kretanje krutog tela sa kontaktom u tački (a) i pneumatskog točka (b); pojam efektivnog mikroprofila (prema [29])

Pri analitičkom ili empirijskom tretmanu kotrljanja pneumatika, pravilno opisivanje prirode kontakta pneumatika sa mikroprofilom podloge ima ključan uticaj na validnost pristupa. Ukoliko se radi o neravninama čija je minimalna talasna dužina u dovoljnoj meri veća od dužine kontaktne površine, tada geometrijski uslovi ne dovode do ispoljavanja filtrirajućih svojstava pneumatika. U takvim uslovima efektivni mikroprofil ne razlikuje se od stvarnog profila podloge, pa se kontakt između pneumatika i podloge može sa zadovoljavajućom tačnošću modelirati kontaktom u tački. Može se smatrati da ovakva pretpostavka važi kada je talasna dužina neravnina višestruko veća od dužine kontaktne površine [56] [74]. S obzirom da su uslovi eksploatacije za koje važe navedeni geometrijski odnosi kod drumskih vozila ne samo realni već i uobičajeni, analiza vertikalne dinamike vozila se često sprovodi bez potrebe da se stvarni mikroprofil transformiše u efektivni. Tako se značajno pojednostavljuje postupak bez narušavanja relevantnosti dobijenih rezultata. Nepripremljene podloge se, međutim, odlikuju mnogo većim sadržajem kratkotalasnih neravnina, pa je pri analizi dinamike vanputnih vozila upotreba ovakvog pristupa, iako u literaturi dosta zastupljena zbog jednostavnosti, često neopravdana.

Očigledno je da pri nekoj konačnoj brzini kretanja dinamički efekti pri kotrljanju pneumatika, preko oscilatornih parametara sistema (masa, krutost, prigušenje) odnosno od njih zavisnih fluktuacija defleksije i vertikalnog opterećenja pneumatika, utiču na oblik efektivnog mikroprofila. Transformacija stvarnog profila podloge u efektivni pri jednom posmatranom radnom režimu točka u smislu nepromenljivosti svih njegovih parametara uključujući i vertikalno opterećenje odnosno njemu proporcionalnu defleksiju i dužinu kontaktne površine, međutim, je isključivo geometrijskog karaktera i zavisi od lokalnih deformacija kontaktne površine pri obuhvatanju neravnina podloge. Za dalje proučavanje problema od interesa je da se uvede pojam efektivnog mikroprofila definisanog u statičkim odnosno kvazistatičkim uslovima, dakle pri nepostojanju pratećih dinamičkih efekata u vidu oscilatornog kretanja oslonjene mase. Pri tome je pre svega važno naglasiti da se misli na uslove u kojima su vertikalna reakcija, radialna defleksija i kontaktna dužina konstantni. Efektivni mikroprofil generisan u ovakvim uslovima biće nazvan **kvazistatička envelopa kretanja** pneumatika, prema [24] [74] [98].

Geometrija profila podloge predstavlja spoljne uslove, koji ne utiču na dinamička svojstva pneumatika definisana karakteristikama njegove elastične strukture. Razmatranje filtrirajućih svojstava pneumatika nije, kako je pokazano, relevantno za analizu kretanja po glatkim podlogama sa dugotalasnim neravninama. Za razliku od ovog slučaja, međutim, izučavanje kretanja po izrazito neravnim podlogama mora da obuhvati i generisanje efektivnog mikroprofila. Kako je, međutim, ponašanje same elastične strukture u oba slučaja isto, u nekim slučajevima može biti svrsishodno odvojeno razmatranje ova dva fenomena (generisanje mikroprofila i ponašanje elastične strukture). Posledično, u upotrebi je jedan broj modela koji su predviđeni isključivo za modeliranje formiranja kvazistatičke envelope, kao i onih koji se, iako manje ili više opštijeg karaktera, mogu koristiti u tu svrhu, odvojeno od ostalih karakteristika pneumatika koje obuhvataju svojom strukturom (engleski naziv: *tire enveloping models*). U nedostatku odmaćenog termina za ovakve modele u literaturi na našem jezičkom području, u daljem tekstu će se za njih koristiti pojam **modeli envelope kretanja**. Postojeći modeli envelope kretanja se pretežno oslanjaju na strukturu pneumatika, često značajno pojednostavljenu. Sa druge strane, neki od danas vrlo značajnih modela su empirijski odnosno poluempirijski zasnovani. Pregled ovih modela obuhvaćen je tačkom 2.2.

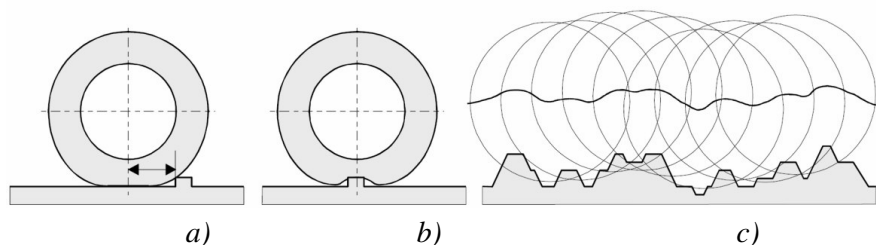
Na ovom mestu se naglašava da će u daljem tekstu pojmovi "envelopa kretanja" i "efektivni mikroprofil" biti korišćeni kao sinonimi. Pojam "kvazistatička envelopa kretanja" odnosi se na envelopu dobijenu na određenoj geometriji podloge u uslovima odsustva dinamičkih fluktuacija vertikalnog opterećenja koje svojim uticajem na defleksiju i kontaktnu dužinu pneumatika dovodi do izmena njegovih geometrijskih filtrirajućih svojstava.

3.4.2 MEHANIZAM FORMIRANJA KVAZISTATIČKE ENVELOPE KRETANJA – PNEUMATIK KAO GEOMETRIJSKI NISKOPOJASNI FILTER

Ponašanje pneumatika na kratkotalasnim neravninama, odnosno princip formiranja kvazistatičke envelope kretanja, biće objašnjen na primeru savladavanja singularne neravnine kakva je prikazana na slici 7, a) i b). Pri kotrljanju pneumatika preko takve neravnine, njegov prednji segment će na osnovu geometrijskih uslova doći u kontakt sa nailaznom ivicom neravnine pre nego što se iznad te ivice nađe središte točka (slika 7 a). Zbog simetrije točka i prepreke u odnosu na vertikalnu osu, ista konstatacija (ali u obrnutom smeru) važi i za završetak kontakta pneumatika i neravnine nakon prelaska zadnjeg segmenta pneumatika. Ova, geometrijski uslovljena, zakonitost čini da dužina odziva pneumatika u prostornom domenu kod singularne neravnine mora biti veća nego što je to dužina pobude. Drugim rečima, dužina kvazistatičke envelope veća je od dužine njoj odgovarajuće neravnine podloge.

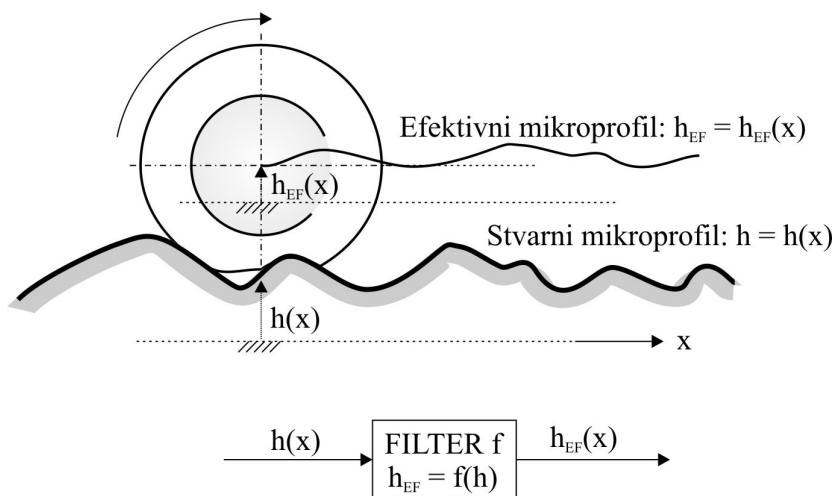
Sledeći faktor mehanizma generisanja kvazistatičke envelope kretanja prikazan je na slici 7 b). Prilikom prelaska pneumatika preko diskretne neravnine čija je dužina manja od dužine kontaktne površine, usled dejstva vertikalne sile a zahvaljujući deformabilnosti strukture pneumatika, kontaktna površina se lokalno deformiše, delimično ili potpuno obavijajući neravninu. Usled toga, najveća visina koju centar točka dostiže pri savlađivanju neravnine, u odnosu na onu njegovu visinu koja odgovara ravnoj podlozi, ostaje manja od visine same neravnine.

Treći mehanizam, koji je zasnovan istovremeno i na geometriji i na dejstvu lokalnih deformacija, predstavlja transformacija oštih, singularnih ivica posmatrane neravnine u glatke segmente kvazistatičke envelope.



Slika 7. Pojave pri kotrljanju pneumatika po podlozi sa kratkotalasnim neravninama: a) povećanje dužine odziva u odnosu na dužinu pobude; b) obavijanje kontaktne površine oko diskretne neravnine – smanjenje visine odziva u odnosu na visinu pobude; c) rezultujuće geometrijsko filtriranje neravnina podloge [98]

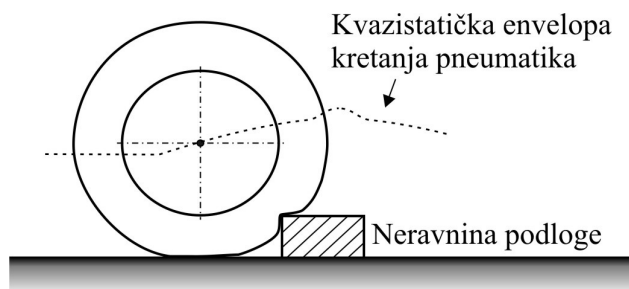
Sva tri opisana efekta rezultiraju time da se, u prostornom domenu, odziv pneumatika odlikuje većom talasnom dužinom (tj. nižom putnom frekvencijom) i manjom amplitudom u odnosu na pobudu. Sledi zaključak da se u slučaju proizvoljnog profila podloge, sačinjenog od niza diskretnih neravnina (slika 7 c) ili kontinualno promenljivu, frekventni sadržaj pobude transformiše tako da se kod odziva pojedinačni harmonici premeštaju u područja nižih frekvencija, što predstavlja karakteristiku niskopojasnog filtera. Takođe, generalno, postoji i trend smanjenja amplituda pobude u odnosu na izvorne vrednosti (stvarna geometrija podloge). Svojstvo pneumatika da vrši geometrijsko filtriranje neravnina podloge šematski je prikazano na slici 8.



Slika 8. Šematski prikaz filtrirajućeg svojstva pneumatika; f – funkcija koja opisuje karakteristike formiranja efektivnog mikroprofila

3.4.3 JEDAN SPECIJALNI SLUČAJ KVAZISTATIČKE ENVELOPE KRETANJA I ODGOVARAJUĆI GEOMETRIJSKI PARAMETRI

Od strane nekih autora (npr. [5], [98]) uočena je i korišćena činjenica da se oblik efektivnog mikroprofila pri prelasku preko singularne neravnine pravilnog geometrijskog poprečnog preseka kao što su npr. kvadratni, pravougaoni i sl. (slika 9) može prikazati kao suma dve fazno pomerene tzv. bazne funkcije⁴ (slika 10). Iako ovaj pristup nije direktno korišćen u okviru predmetnog istraživanja, ovde se pominje zbog svoje prikladnosti za definisanje geometrijskih parametara odgovarajućih kvazistatičkih envelope. Upotreba ovih geometrijskih parametara (definisanih u nastavku teksta) pogodna je pri izučavanju svojstava različitih formi envelope kretanja i pri njihovom međusobnom upoređivanju. Takođe, treba istaći da je posmatrana forma neravnine podloge, a time i njoj odgovarajuća envelope kretanja pneumatika, od posebnog interesa s obzirom da se u praksi veoma često koristi za ispitivanje oscilatornog ponašanja pneumatika, uključujući i ovo istraživanje.



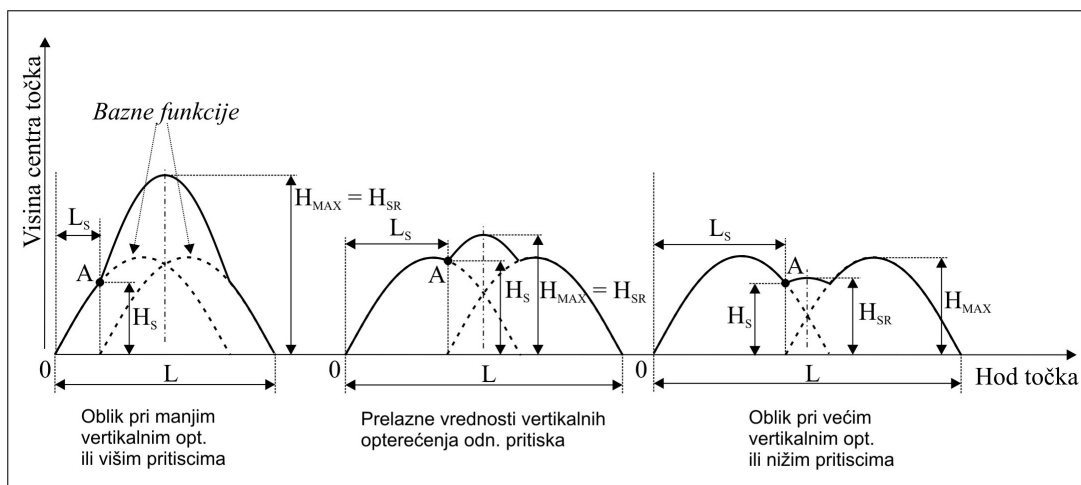
Slika 9. Primer singularne neravnine pravilnog geometrijskog poprečnog preseka [86]

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju da, u zavisnosti od eksploatacionih parametara pneumatika (pre svega u smislu vertikalnog opterećenja i pritiska pneumatika), diskretnoj neravnini kakva je prikazana na slici 9 mogu odgovarati tri različite generalne forme kvazistatičke envelope, prikazane na slici 10. Na istoj slici ilustrovan je i postupak dobijanja kvazistatičke envelope kretanja sabiranjem dve fazno pomerene bazne funkcije. Karakterističan je simetrični oblik kvazistatičke envelope za ovakvu vrstu profila podloge, što je i očekivano s obzirom na mehanizam njegovog nastanka. Idući s leva nadesno, prikazane forme efektivnog mikroprofila odgovaraju snižavanju pritiska odnosno povećanju vertikalnog opterećenja pneumatika. Osnovni pojmovi i geometrijski parametri posmatrane envelope su, prema slici 10:

- tačka diskontinuiteta (tačka A) – tačka na kojoj kvazistatička envelope menja karakter, odnosno uzdužna lokacija geometrijskog početka fazno pomerene bazne funkcije
- fazni pomak baznih funkcija / uzdužno rastojanje tačke diskontinuiteta od mesta početka odziva pneumatika – L_S
- visina tačke diskontinuiteta – H_S
- maksimalna visina efektivnog mikroprofila – H_{MAX}

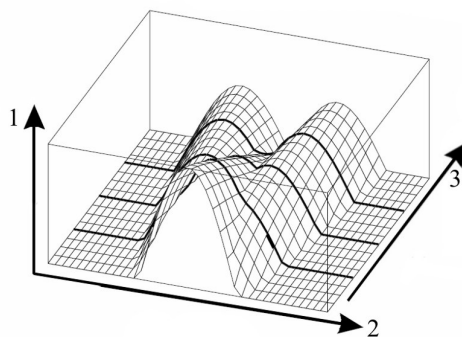
⁴ Ove funkcije mogu biti, na primer, pozitivne polovine sinusne funkcije, i druge funkcije slične geometrije.

- visina efektivnog mikroprofila u središnjoj tački – H_{SR}
- ukupna dužina odziva pneumatika u prostornom domenu – L



Slika 10. *Moguće forme efektivnog profila i geometrijski parametri*

Na slici 11 prikazan je kvalitativni tok promene kvazistatičke envelope pri kvazistatičkom kotrljanju pneumatika preko prepreke kakva je prikazana na slici 9, u zavisnosti od vertikalnog opterećenja [98]. Smer "3" prikazuje porast vertikalnog opterećenja, tako da je ono najmanje u presečnoj ravni paralelnoj sa osama "1" i "2" najbližoj oku posmatrača, da bi duž pozitivnog smeru ose "3" dolazilo do njegovog kontinualnog porasta. Prikazana zavisnost važi za konstantni pritisak u pneumatiku. Principijelno isti izgled prikazanog dijagrama mogao bi se dobiti i pri konstantnom vertikalnom opterećenju, tako da se u pozitivnom smeru ose "3" vrednosti pritiska u pneumatiku menjaju od višim ka nižim.



Slika 11. *Promena karakteristike efektivnog mikroprofila sa promenom vertikalnog opterećenja pri konstantnom pritisku, pri prelasku preko singularne prepreke [98]:*
 1 – visina efektivnog mikroprofila, 2 – uzdužno pomeranje, 3 – smer porasta vertikalnog opterećenja

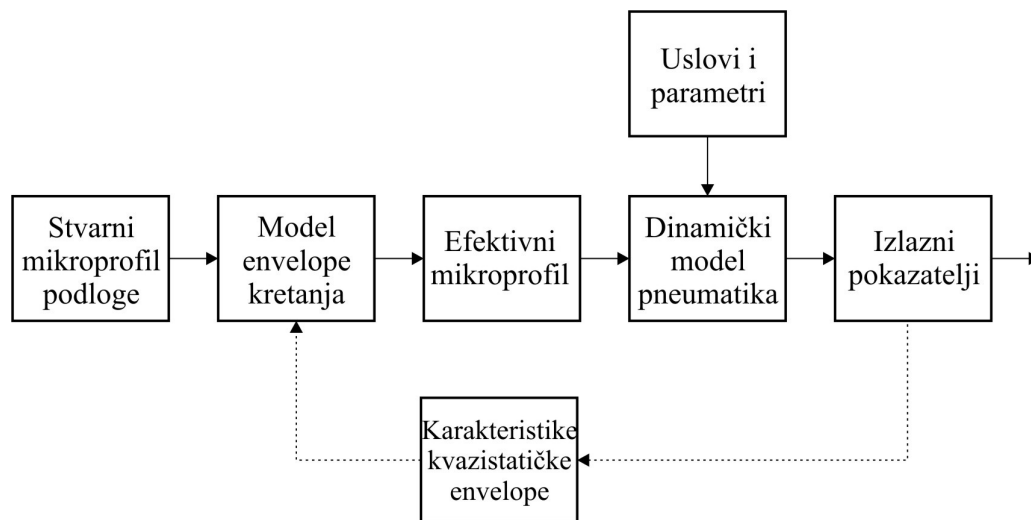
3.4.4 UPOTREBA KVAZISTATIČKE ENVELOPE PRI RAZMATRANJU DINAMIČKOG PONAŠANJA PNEUMATIKA

U prethodnim razmatranjima napomenuto je da karakteristika pneumatika pri generisanju kvazistatičke envelope kretanja pri datim eksploatacionim uslovima u ključnoj meri, osim od dimenzija pneumatika, zavisi takođe i od lokalnih deformacija. Ove deformacije su, kao i njima odgovarajuće elementarne sile, određene izrazito kompleksnim formama ponašanja kompozitno-elastomerne strukture. Uz to, praktično svi tipični i za praksu relevantni slučajevi kretanja pneumatika uključuju relativno velike deformacije, što posebno ističe nelinearnosti u geometriji i formama ponašanja materijala. Analitički tretman ponašanja pneumatika na bazi ovih elementarnih deformacija, koji podrazumeva uzimanje u obzir pomenutih složenih fizičkih mehanizama, stoga je veoma zahtevan kako u pogledu personalnog angažmana neophodnog za razvoj i aplikaciju modela, tako i u pogledu raspolaganja bazom podataka o inženjerskim parametrima korišćenih materijala, a u krajnjoj liniji i u pogledu potrebnog vremena izvršavanja na računaru u okviru softvera za sprovođenje simulacija. U opštem slučaju, dakle, ovakav tretman opravdan je samo u slučajevima kada je u fokusu posmatranja sam pneumatik, kao npr. kada se prilikom razvoja novog ili konstruktivnih modifikacija postojećeg tipa pneumatika putem simulacije dolazi do informacija o uticaju određene konstruktivne izmene na određeni aspekt ponašanja. Alternativno, analitički pristup je opravdan i u slučaju kada je potrebna analiza nekog specifičnog vida uticaja pneumatika na ponašanje vozila sa izraženim zahtevom za visokom tačnošću, pri čemu vreme izvršavanja ne predstavlja ograničavajući faktor (npr. vibroakustička analiza i dr.)

U slučaju kada se pneumatik koristi u okviru simulacije dinamike vozila, međutim, kao jedan od uobičajenih zahteva navodi se između ostalog redukcija složenosti modela odnosno broja potrebnih parametara, kao i vremena potrebnog za izvršavanje simulacije. U nekim slučajevima postoji i eksplicitna potreba za izvršenjem u realnom vremenu, npr. kad se simulacija izvršava u funkciji razvoja određene hardverske komponente sistema automatskog upravljanja⁵ [26] [39]. Zbog toga se ovakvi modeli po pravilu zasnivaju na pretpostavkama na osnovu kojih se fizička struktura pneumatika zamenjuje znatno jednostavnijim modelom. Ovde se pre svega misli na modele kod kojih se elastičnost u radijalnom, tangencijalnom i bočnom pravcu modelira setom diskretnih elastičnih i prigušnih elemenata, uz upotrebu nekog odgovarajućeg modela horizontalnog kontakta sa podlogom. I pri ovakvim pojednostavljenjima mogu se postići rezultati zadovoljavajuće tačnosti za jedan određeni dijapazon eksploatacionih uslova, pre svega kada je reč o dijapazonu frekvencija pobude posmatranog dejstva. Ovakva pojednostavljena struktura, sposobna da odgovori na zahtev za numeričkom efikasnošću, međutim, po pravilu nije u mogućnosti da na zadovoljavajući način modelira karakteristike generisanja efektivnog mikroprofila, što znači da je ovde reč o modelima predviđenim da kontakt sa podlogom interpretiraju kao singularnu tačku. Stoga je važno da se, u slučaju potrebe za analizom ponašanja pneumatika odnosno vozila u uslovima prisustva kratkotalasnih neravnina podloge, funkcionalnost korišćenog modela proširi dodavanjem nezavisnog modela envelope kretanja. Tada model envelope kretanja služi za generisanje efektivnog mikroprofila, koji se dalje koristi kao pobuda za model sa kontaktom u tački. Ukoliko se želi veći stepen tačnosti ili širi dijapazon spoljnih uslova pri sprovođenju simulacije, model envelope kretanja može biti razvijen tako da bude u mogućnosti da obuhvati fluktuacije

⁵ Tzv. "hardware-in-the-loop" pristup

dinamičkog opterećenja točka koje dovode i do fluktuacija defleksije odnosno dužine kontaktne površine pneumatika, menjajući time karakteristiku niskopojasnog filtera kontinualno u toku vremena. Značajniji modeli envelope kretanja razvijeni u novije vreme po pravilu se odlikuju ovakvom funkcionalnošću [74] [98]. Jedna moguća šema sprovođenja ovog pristupa prikazana je na slici 12.



Slika 12. Šematski prikaz upotrebe modela envelope kretanja i dinamičkog modela pneumatika kao nezavisnih elemenata

4. PRIMENA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA ZA EMPIRIJSKO MODELIRANJE

4.1 Uvodne napomene

Oblasti primene veštačkih neuronskih mreža su brojne i obuhvataju razne vidove upravljanja sistemima, modeliranja ulazno-izlaznih relacija, postavljanja prognoza, prepoznavanja i klasifikacije obrazaca itd. Shodno tome u upotrebi je veći broj vrsta neuronskih mreža, s obzirom na to da se za različite oblasti primene mogu zahtevati različita funkcionalna svojstva i performanse neuronskih mreža. Stoga se različite vrste mogu međusobno u manjoj ili većoj meri razlikovati. Ovaj rad se bavi primenom veštačke neuronske mreže u funkciji modeliranja nepoznate funkcionalne zavisnosti između ulaznih i izlaznih veličina posmatranog sistema. Za ovaj postupak izabrane su unapred usmerene neuronske mreže kod kojih se koristi princip obučavanja vođenjem greške unazad⁶. Zato će u okviru ovog poglavlja prikaz biti usmeren pretežno na ovu vrstu neuronskih mreža, njihove karakteristike i proces obučavanja. Prikaz većeg broja značajnijih tipova neuronskih mreža i njihovih karakteristika svakako bi značajno povećao obim poglavlja, a kako se, međutim, radi o sadržaju koji nije relevantan u kontekstu zadatog problema, odlučeno je da isti bude izostavljen. Prikaz koji sledi u najvećoj meri je baziran na referencama [44] [49] [51] [91].

Zajednička karakteristika svih pomenutih vrsta veštačkih neuronskih mreža jeste sprovođenje simuliranog procesa učenja u funkciji uspostavljanja željene funkcije neuronske mreže. Unapred usmerene veštačke neuronske mreže sa vođenjem greške unazad će u daljem tekstu, u funkciji kompaktnosti korišćenih termina, biti nazivane BP neuronske mreže. Skraćenica BP potiče od engleskog termina „backpropagation“, koji označava algoritam za obuku neuronskih mreža karakterističan po tome što se informacija o grešci (odnosno odstupanju između stvarne i željene izlazne vrednosti), neophodna za sprovođenje obuke, prostire od izlaza ka ulazu u mrežu (o čemu će biti reči u nastavku).

4.2 Matematički model veštačke neuronske mreže

Veštačke neuronske mreže se realizuju putem računarskih programa pomoću kojih se modelira princip obrade informacija u mozgu, ukratko i značajno pojednostavljeno opisan u prethodnoj tački. Shodno tome, njihova realizacija mora biti zasnovana na prikladnim matematičkim formalizmima podesnim za izvođenje na računaru.

⁶ Eng. Feed-forward, Backpropagation

4.2.1 NEURON KAO OSNOVNA JEDINICA VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

Biološki neuron, kako je navedeno, može biti u aktivnom ili pasivnom stanju. Ovo predstavlja osnov za model neurona sa diskretnim stanjima, kod koga se aktivno stanje uobičajeno modelira vrednošću 1, a pasivno vrednošću 0 ili -1. Osim diskretnog, u upotrebi je takođe i model neurona sa kontinualnim skupom mogućih stanja, takođe najčešće između 0 i 1 (ili između -1 i 1). Ulazni signali, s obzirom na to da predstavljaju izlazne signale drugih neurona, izvorno takođe imaju neku od vrednosti iz pomenutog dijapazona. Njihovi signali se, pre saopštavanja posmatranom neuronu, modifikuju putem sinapsi. Ove modifikacije modeliraju se množenjem vrednosti izlaznih signala neurona realnim brojevima, pozitivnim ili negativnim. Ovi brojevi se stoga nazivaju sinaptički ili težinski koeficijenti, w . Suma ulaznih signala pomnoženih sinaptičkim koeficijentima naziva se kumulativni ili neto ulaz neurona, u literaturi najčešće označen sa net :

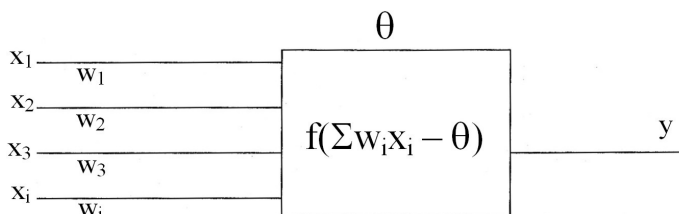
$$net = \sum x_i w_i \dots \dots \dots (1.)$$

net – kumulativni (neto) ulazni signal neurona;

x_i – ulazni signali posmatranog neurona;

w_i – sinaptički koeficijenti odgovarajućih ulaznih signala.

Pored ulaznih signala i sinaptičkih koeficijenata, jedna od veličina koja učestvuje u procesu obrade signala je i tzv. prag neurona, θ . O značenju ove veličine biće reči u nastavku teksta. Šema modela neurona sa ulaznim signalima x_i , sinaptičkim koeficijentima w_i , pragom θ i izlaznim signalom y prikazana je na slici 13 [44].



Slika 13. Šematski prikaz matematičkog modela neurona [44]:
 x_i – veličina i -tog ulaznog signala; w_i – i -ti sinaptički (težinski) koeficijent; θ - prag neurona; y – veličina izlaznog signala neurona

Važan parametar neurona je aktivaciona ili prenosna funkcija, koja definiše veličinu izlaznog signala na osnovu kumulativnog ulaza i praga. Kod neurona sa diskretnim stanjima, kumulativni ulazni signal se upoređuje sa pragom θ . Ukoliko dođe do prekoračenja praga, neuron postaje aktivan pa izlazni signal ima vrednost 1. U suprotnom neuron je u pasivnom stanju, odnosno vrednost izlaznog signala iznosi 0. Stoga diskretna aktivaciona funkcija predstavlja Hevisajdovu odskočnu funkciju definisanu izrazom:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \dots \dots \dots (2.)$$

$f(x)$ – diskretna aktivaciona funkcija (odskočna funkcija);

Izlazni signal određen je relacijom:

$$y = f(\text{net}-\theta) \dots\dots\dots(3.)$$

Kod neurona sa kontinualnim stanjima, koristi se nekoliko formi aktivacionih funkcija. Jedna od najčešće korišćenih je funkcija sigmoidne forme koja poprima izlazne vrednosti u intervalu između 0 i 1:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-cx}} \dots\dots\dots(4.)$$

$f(x)$ – kontinualna aktivaciona funkcija (sigmoida);

Uobičajeno je da se u primeni aktivacione funkcije u formi sigmoide (4) za konstantu c usvoji vrednost:

$$c = 1$$

Veličina izlaznog signala u slučaju kontinualne aktivacione funkcije (4) određena je takođe relacijom (3).

Odskočna funkcija (2) i sigmoida (4) prema literaturi predstavljaju najvažnije ali ne i jedine forme aktivacione funkcije. Osim ovih, u upotrebi su i druge forme funkcija kao što su linearna (identička), semi-linearna, hiperbolički tangens i dr.

4.2.2 STRUKTURA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

Neuronska mreža nastaje međusobnim povezivanjem većeg broja neurona putem veza za prenos signala. Jedan primer strukture neuronske mreže prikazan je na slici 14 [51]. Na prikazanom primeru sinaptički koeficijenti umesto opštih oznaka imaju, u svrhu ilustracije, konkretne numeričke vrednosti. U opštem slučaju, sinaptički koeficijenti se označavaju oznakom:

w_{ij} – sinaptički koeficijent između neurona i i neurona j ;

Na posmatranom primeru na slici 14, na primer, sinaptički koeficijent između neurona 4 i 8 ima vrednost 0,7, odnosno, prema navedenoj notaciji:

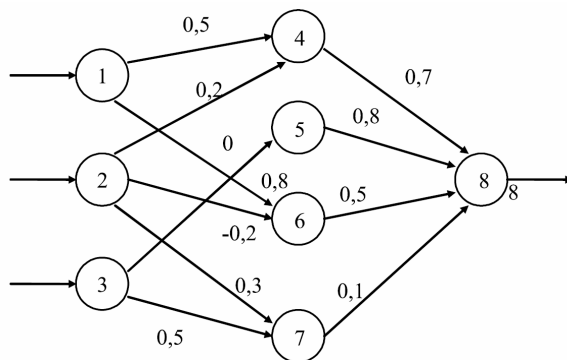
$$w_{48} = 0,7$$

Neuroni u posmatranoj mreži su grupisani po slojevima i to:

- ulazni sloj: neuroni 1, 2 i 3;
- skriveni sloj: neuroni 4, 5, 6 i 7;

- izlazni sloj: neuron 8.

Nazivi slojeva korespondiraju sa funkcijom neurona koji ih sačinjavaju. Ulaznim neuronima nazivaju se oni preko kojih mreža prima informacije iz okoline, odnosno preko kojih se mreži saopštavaju ulazne veličine. Izlazni neuroni emituju odziv mreže, odnosno predstavljaju izlazne veličine koje, pri datoj strukturi mreže i vrednostima sinaptičkih koeficijenata, odgovaraju datim vrednostima ulaznih veličina. Skriveni neuroni su oni koji nemaju neposrednu komunikaciju sa okolinom, već samo sa drugim neuronima. Skrivenih slojeva može biti više.



Slika 14. Primer strukture unapred usmerene neuronske mreže sa jednim skrivenim slojem [51]

Signal se preko sinaptičkih veza vodi od ulaznog do skrivenog sloja, gde se na osnovu praga i prenosne funkcije definišu vrednosti izlaznih signala pojedinačnih pripadajućih neurona. Ove vrednosti, dalje, predstavljaju ulaz za naredni – izlazni sloj. Tok signala neuronske mreže prikazane na slici 14 je takav da ne postoji povratna sprega, odnosno signal se prostire isključivo u jednom smeru, unapred, od ulaznih, preko skrivenih, ka izlaznim neuronima. Prikazana neuronska mreža pripada unapred usmerenim mrežama. Osim prikazanog primera, struktura neuronske mreže i tok signala mogu imati i sasvim drugačije forme, koje, prema obrazloženju navedenom u uvodnim razmatranjima ovog poglavlja, ovde neće biti prikazane niti razmatrane.

4.2.3 OPŠTI PRINCIPI OBUKE BP NEURONSKIH MREŽA

Proces obuke veštačkih neuronskih mreža predstavlja postupak adaptacije sinaptičkih koeficijenata sa ciljem da se, pri zadatoj topologiji mreže, za zadate ulazne dobiju željene izlazne veličine. Ovaj postupak se po pravilu sprovodi u okviru softvera za simulaciju neuronskih mreža izvršavanjem nekog od u tu svrhu razvijenih matematičkih algoritama. Kod BP neuronskih mreža primenjuje se proces tzv. nadgledanog učenja koji karakteriše raspoloživost određenog broja unapred poznatih parova ulazno-izlaznih vrednosti⁷. Drugim rečima, zadat je određen skup vrednosti izlaznih veličina koje mreža treba da realizuje za odgovarajuće zadate vrednosti ulaznih veličina. Proces učenja odnosno

⁷ Ulazne odnosno izlazne veličine pri tome mogu biti višedimenzione veličine odnosno vektori.

korekcije sinaptičkih koeficijenata zasniva se na izračunavanju greške između stvarne i željene vrednosti izlaza mreže odnosno pojedinačnih izlaznih neurona. U nastavku će biti prikazani osnovni principi nadgledanog učenja sa vođenjem greške unazad.

Posmatra se slučaj primene BP neuronske mreže za reprodukciju neke nepoznate funkcionalne zavisnosti koja predstavlja vezu između ulaznih i izlaznih veličina. U funkciji daljih razmatranja uvode se sledeće veličine i oznake:

- $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N)^T$ – ulazna veličina posmatrane funkcionalne zavisnosti odnosno ulaz za neuronsku mrežu;
- $\mathbf{Y} = (Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_K)^T = \mathbf{Y}(\mathbf{x})$ – izlazna veličina posmatrane funkcionalne zavisnosti;
- $\mathbf{y} = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_K)^T = \mathbf{y}(\mathbf{x})$ – izlazna veličina neuronske mreže;
- $\mathbf{x}_q, \mathbf{Y}_q(\mathbf{x}_q), \mathbf{y}_q(\mathbf{x}_q)$ – konkretne brojučane vrednosti veličina \mathbf{x} , $\mathbf{Y}(\mathbf{x})$ i $\mathbf{y}(\mathbf{x})$ ($q = 1, 2, \dots, M$)
- N – broj komponenta ulaznog vektora \mathbf{x} (broj ulaznih veličina)
- K – broj komponenta izlaznih vektora \mathbf{y} odnosno \mathbf{Y} (broj izlaznih veličina)
- M – broj parova ulaznog (\mathbf{x}_q) i izlaznog (\mathbf{Y}_q) vektora koji reprezentuju posmatranu funkcionalnu zavisnost $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{x})$
- w_{ij} – sinaptički koeficijenti između neurona i i neurona j

Zadatak neuronske mreže je implicitno uspostavljanje posmatrane funkcionalne zavisnosti. Rezultat obuke neuronske mreže stoga treba da bude njena sposobnost da reprodukuje ovu zavisnost na način da za neko zadato \mathbf{x}_q vrednost $|\mathbf{Y}_q(\mathbf{x}_q) - \mathbf{y}_q|$ bude što bliža nuli. U svrhu izvršavanja traženog zadatka, potrebno je sprovesti proces nadgledanog obučavanja neuronske mreže što se sastoji u tome da se sinaptičkim koeficijentima w_{ij} iterativnim postupkom dodele takve vrednosti da funkcija $\mathbf{y}(\mathbf{x})$ na što bolji način reprezentuje funkciju $\mathbf{Y}(\mathbf{x})$. Opšti postupak sprovođenja obuke biće, zbog preglednosti, ukratko opisan raščlanjeno, po pojedinačnim koracima.

1. Izbor vrednosti koje reprezentuju funkciju $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{x})$

U funkciji sprovođenja nadgledanog učenja čiji je cilj implicitno uspostavljanje funkcionalne zavisnosti $\mathbf{y} = \mathbf{y}(\mathbf{x})$ preko neuronske mreže tako da funkcija $\mathbf{y}(\mathbf{x})$ predstavlja funkciju $\mathbf{Y}(\mathbf{x})$, potrebno je da postoji određen broj parova vrednosti $(\mathbf{x}_q, \mathbf{Y}_q)$, $q = 1, 2, \dots, M$, koji reprezentuju posmatranu funkcionalnu zavisnost. Kako je funkcija $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{x})$ nepoznata, konkretne vrednosti \mathbf{Y}_q moraju biti određene na neki adekvatan način, kao npr. eksperimentalnim merenjima, statističkom analizom i sl. Pošto veštačka neuronska mreža stiče "znanje" o posmatranoj pojavi samo na osnovu raspoloživog skupa podataka, izbor ovog skupa u funkciji reprezentativnosti pojave je veoma važan za postignute rezultate obuke u smislu tačnosti i sposobnosti generalizacije kao suštinski važnih pokazatelja obučene mreže.

2. Inicijalizacija sinaptičkih koeficijenata w_{ij}

Na početku procesa obuke, sinaptičkim koeficijentima w_{ij} se, prema nekom unapred određenom kriterijumu, dodeljuju inicijalne vrednosti. Često je u upotrebi slučajni izbor brojeva iz nekog zadatog intervala. Za ove inicijalne vrednosti sinaptičkih koeficijenata, vrednosti izlaznih vektora neuronske mreže \mathbf{y}_q će se po pravilu razlikovati od odgovarajućih vrednosti predmetne funkcije, \mathbf{Y}_q , tako da postoji određena greška koja se može definisati npr. kao euklidsko rastojanje između vrednosti \mathbf{y}_q i \mathbf{Y}_q ($E_q = \|\mathbf{Y}_q - \mathbf{y}_q\|$), ili kao kvadrat ove vrednosti.

3. Adaptacija sinaptičkih koeficijenata

Zadatak algoritma za obuku veštačke neuronske mreže, čije izvršavanje predstavlja sam proces učenja, je određivanje promene vrednosti sinaptičkih koeficijenata, Δw_{ij} , tako da nakon njihove izmene greška E_q bude manja u odnosu na prvobitnu vrednost. U prvom koraku, algoritam za obuku obrađuje prvi od M raspoloživih parova vrednosti ($\mathbf{x}_q, \mathbf{Y}_q$) i, na osnovu izračunatog izlaza \mathbf{y}_q odnosno odstupanja E_q , vrši izmenu sinaptičkih koeficijenata u skladu sa nekim od za to namenjenih računskih postupaka. Nakon toga, obrađuje se sledeći od M raspoloživih parova. Nakon što algoritam na ovaj način obradi svih M raspoloživih parova vrednosti, završen je jedan kompletan **ciklus učenja**. Kumulativna greška odnosno odstupanje na nivou čitavog skupa podataka određuje se sumiranjem pojedinih vrednosti E_q na adekvatan način (izračunavanje srednje kvadratne vrednosti ili sl.). Ceo postupak se ciklično ponavlja tako da se greška u svakom sledećem ciklusu u određenoj meri smanjuje. Algoritam se sprovodi u onoliko koraka (odnosno, drugim rečima, sprovodi se onoliko ciklusa učenja) koliko je potrebno da veličina greške postane manja od neke unapred propisane vrednosti. Alternativno opisanom načinu gde se sinaptički koeficijenti menjaju nakon obrade svakog pojedinačnog para ulazno-izlaznih vrednosti iz skupa podataka, postoji i pristup kod koga se Δw_{ij} se izračunavaju za svaki ulazni vektor \mathbf{x}_q pojedinačno i memorišu, a promena w_{ij} se vrši kumulativno tek nakon obrade svih M ulaznih vektora, $\Delta w_{ij} = \sum_q \Delta w_{ijq}$.

4.2.4 UČENJE SA VOĐENJEM GREŠKE UNAZAD

Metod vođenja greške unazad predstavlja algoritam za obučavanje višestepenih unapred usmerenih mreža. Algoritam je zasnovan na matematičkom formalizmu nezavisnom od topologije mreže i oblika funkcije za čije se modeliranje mreža obučava. Naziv metoda (eng. "*Backpropagation*") potiče od principa po kom se informacija o grešci, odnosno odstupanju između zadate i dobijene vrednosti izlazne veličine, usmerava od izlaznog, preko skrivenih, ka ulaznom sloju, odnosno prostire se unazad u odnosu na topologiju mreže. Na osnovu informacije o grešci vrši se modifikacija sinaptičkih koeficijenata tako da veličine sinaptičkih koeficijenata narednog sloja figurišu u obrascima za izmenu sinaptičkih koeficijenata prethodnog sloja⁸. Pri tome se počinje sa modifikacijama sinaptičkih koeficijenata između izlaznog i poslednjeg skrivenog sloja, pa se dalje nastavlja sa modifikacijama redom po slojevima unazad. U nastavku će proces, radi jednostavnosti, biti opisan na primeru dvostepene mreže odnosno mreže sa jednim skrivenim slojem. Pojam "dvostepena" ovde označava da su sinaptički koeficijenti

⁸ Na ovom mestu se pod pojmovima „prethodni“ i „naredni“ misli na topologiju mreže u smislu da ulazni sloj prethodi prvom skrivenom itd.

raspoređeni u dva nivoa, jedan između ulaznog i skrivenog a drugi između skrivenog i izlaznog sloja. Analogna razmatranja koja su u nastavku data za mrežu sa jednim, važe i za mrežu sa proizvoljnim brojem skrivenih slojeva. U daljem će biti korišćene sledeće oznake:

w_{1ij} – sinaptički koeficijenti između skrivenog i izlaznog sloja

w_{2ij} – sinaptički koeficijenti između ulaznog i skrivenog sloja

Shodno navedenom, prvo dolazi do izmene sinaptičkih koeficijenata između skrivenog i izlaznog sloja, na osnovu informacije o odstupanju između zadate i stvarne vrednosti na izlazu mreže. Na taj način je informacija o grešci sadržana u novim vrednostima sinaptičkih koeficijenata:

$$\Delta w_{1ij} = \alpha \cdot (Y_j - y_j) \cdot h_i \dots\dots\dots(5.)$$

Δw_{1ij} – promena sinaptičkih koeficijenata između skrivenog i izlaznog sloja

h_i – izlazni signal i-tog neurona u skrivenom sloju

Y_j, y_j – zadata i stvarna vrednost izlaznog signala j-tog neurona u izlaznom sloju

α – faktor učenja

Faktor α bira se iskustveno. Prevelika vrednost može da onemogući konvergenciju algoritma, dok suviše mala vrednost može da uslovi neophodnost sprovođenja isuviše velikog broja ciklusa učenja. O problemima konvergencije algoritma za obuku biće reči u nastavku.

Nakon modifikacija w_{1ij} , sledi korekcija w_{2ij} tj. sinaptičkih koeficijenata između skrivenog i ulaznog sloja. Ova korekcija se vrši kako na osnovu kumulativnog odstupanja izlaza tako i na osnovu novih vrednosti sinaptičkih koeficijenata između skrivenog i izlaznog sloja:

$$\Delta w_{2ij} = \alpha \cdot \sum_m (Y_m - y_m) \cdot w_{1jm} \cdot x_i \dots\dots\dots(6.)$$

Δw_{2ij} – promena sinaptičkih koeficijenata između skrivenog i izlaznog sloja

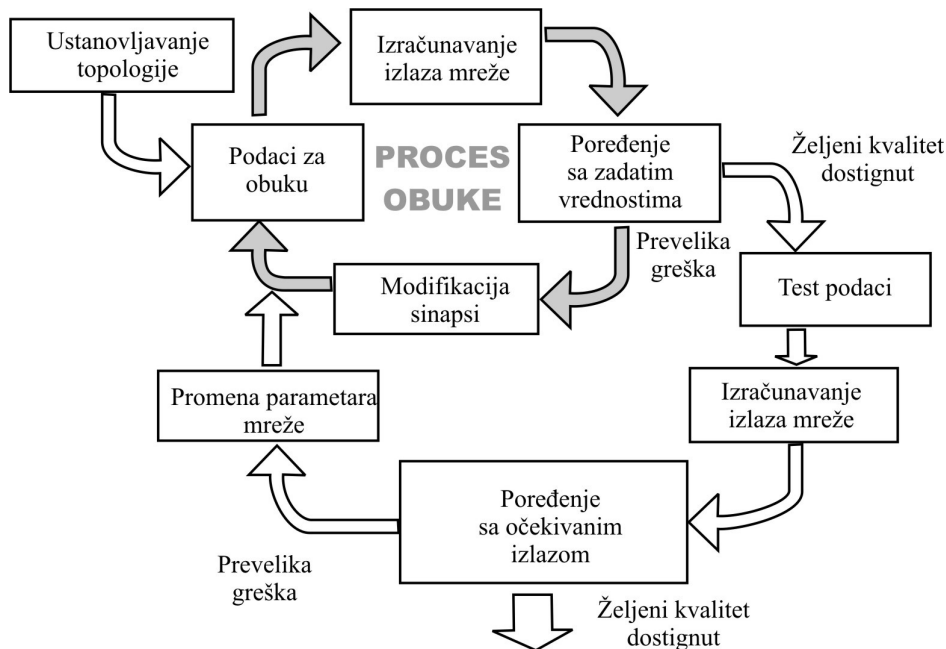
Obrasci (5) i (6) predstavljaju osnovne relacije za izračunavanje korekcija težinskih koeficijenata pri obučavanju neuronskih mreža metodom vođenja greške unazad. Za izvođenje ovih relacija koristi se tzv. metod opadajućeg gradijenta greške. Ovaj postupak je zasnovan je na izboru sigmoide (4) kao aktivacione funkcije neurona [44]. Pri tome značajnu ulogu ima diferencijabilnost ove funkcije i jednostavna forma njenog prvog izvoda. Osim prikazanog načina korekcije sinaptičkih koeficijenata, postoji i jedan broj postupaka kod kojih su prikazani izrazi poboljšani uvođenjem određenih modifikacija. Najvažnija svrha tih modifikacija je ubravanje procesa učenja, poboljšanje konvergencije

algoritma i sl. Detaljniji prikaz ovih modifikacija, kao i matematička izvođenja i dokazi u vezi sa algoritmom za obuku BP neuronskih mreža, mogu se naći u publikacijama koje detaljnije tretiraju problematiku veštačkih neuronskih mreža, npr. [44] [49] [51] [91] [100] i dr.

4.3 Generalne napomene o empirijskim modelima zasnovanim na neuronskim mrežama

Opšti pristup razvoju modela

Pri izboru topologije mreže poželjno je početi od jednostavnijih struktura tj. manjeg broja neurona. Ukoliko se performanse mreže pokažu nedovoljnim, neophodno je postupno usložnjavanje modela. Pri postizanju dobrih rezultata, svrsishodno je pokušati sa uprošćavanjem konfiguracije odnosno smanjenjem broja neurona ili uklanjanjem pojedinih sinamptičkih veza. Time se sa jedne strane poboljšava numerička efikasnostz modela u fazi aplikacije. Sa druge strane, postoji mogućnost da se ovim putem dodatno poboljša sposobnost generalizacije, kako je objašnjeno u prethodnom delu teksta. Principijelna šema opšteg pristupa razvoju modela zasnovanog na veštačkoj neuronskoj mreži prema [49] prikazana je na slici 15.



Slika 15. Opšti postupak razvoja neuronske mreže [49]

Aplikacija modela

U slučaju kada se model zasnovan na neuronskoj mreži posmatra izolovano, tada sam izlazni signal mreže predstavlja informaciju od interesa, odnosno nema potrebe za uvođenjem ovog signala u dalji proces simulacije. U mnogim slučajevima, međutim, ovakav model predstavlja samo deo nekog šireg sistema, tako da je potrebno informacije iz neuronske mreže na adekvatan način proslediti nadovezanim elementima. Kao jedan primer može se navesti upravo koncept usvojen u ovom radu, gde model neuronske mreže prosleđuje signal efektivne oscilatorne pobude elastičnoj strukturi pneumatika, a preko nje oscilujućoj masi vozila. Kao primeri slične prirode korišćeni u oblasti modeliranja sistema motornih vozila mogu se još navesti model amortizera [6] [67] [84], elastomernih oslonaca [6] ili pneumatika [7] zasnovanih na neuronskim mrežama koji se koriste u simulacijama vozila zasnovanih na metodu sistema krutih tela. U ovakvim i sličnim slučajevima neophodno je da postoji odgovarajući interfejs između veštačke neuronske mreže i ostatka sistema. Priroda ovog interfejsa može imati različite, manje ili više složene forme, u zavisnosti od prirode problema.

U opštem slučaju, za primer BP mreže sa jednim skrivenim slojem sa N ulaznih, K skrivenih i jednim izlaznim neuronom, izlazna vrednost se prema razmatranjima datim u tački 4.2.1 na osnovu relacija (1) odnosno (3) izračunava prema izrazu:

$$y = f_3 \left\{ \sum_{i=1}^K w_{2i} \cdot f_2 \left[\sum_{j=1}^N w_{1ji} \cdot f_1 (x_j - \theta_{1j}) - \theta_{2i} \right] - \theta_{3i} \right\} \dots\dots\dots(7.)$$

f_1, f_2, f_3, \dots – kombinacije aktivacionih funkcija (prema /2/, /4/ i dr.) i izlazne funkcije neurona u ulaznom, skrivenom i izlaznom sloju respektivno

w_{1ji}, w_{2i}, \dots – sinaptički koeficijenti između ulaznog i skrivenog, i između skrivenog i izlaznog sloja respektivno

$\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_3, \dots$ – pragovi neurona u ulaznom, skrivenom i izlaznom sloju respektivno

x_i, h_i, y, \dots – signali neurona u ulaznom, skrivenom i izlaznom sloju respektivno

Osnovu aplikacije neuronske mreže predstavlja prikladan način implementacije izraza (7) u okviru globalne strukture modela.

Opšte karakteristike modela

Modeli zasnovani na neuronskim mrežama su, kako je to već više puta istaknuto, čisto empirijske prirode. Takvi modeli se mogu posmatrati kao "crna kutija" koja povezuje ulazne i izlazne podatke ne uzimajući u obzir fizičke zakonitosti koje uslovljavaju karakteristike posmatranog fenomena. To njihovo svojstvo predstavlja prednost u slučajevima kada je potrebno uspostaviti funkcionalnu zavisnost za fenomene koji nisu

dovoljno poznati ili su u posmatranom kontekstu isuviše kompleksni da bi za njihov opis upotreba analitičkog pristupa bila svrsishodna.

Sa druge strane, modeli zasnovani na principu "crne kutije" su u potpuno netransparentni u smislu da ne omogućavaju da se iz modela ekstrahuje "znanje" stečeno obradom empirijskih podataka koji reprezentuju posmatrani fenomen. U tom kontekstu, dalje, u opštem slučaju nije poznato kakav će biti odziv modela kada mu se na ulazu saopšte proizvoljni podaci, odnosno takvi koji nisu korišćeni u procesu razvoja modela. Zbog toga je, u funkciji ocene validnosti odziva modela, neophodno u dovoljnoj meri poznavati fizičku prirodu posmatranog sistema.

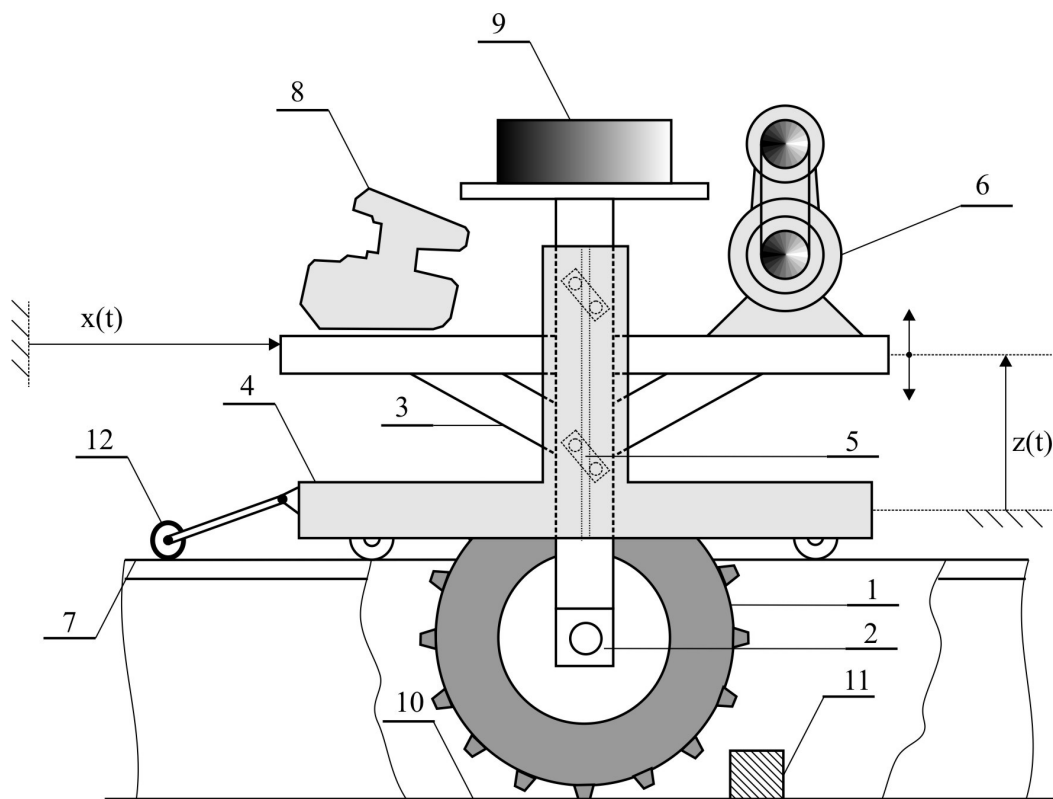
Kao nedostatak ovakvog pristupa može se, takođe, posmatrati relativno dugo vreme koje je u opštem slučaju neophodno za razvoj modela. Ovo vreme sa jedne strane obuhvata neophodne aktivnosti u funkciji optimalnog izbora parametara kao što su topologija neuronske mreže, set podataka ili broj ciklusa učenja, što se zbog nepostojanja jednoznačnih kriterijuma mora izvršiti eksperimentalnim putem. Sa druge strane, sam proces obuke neuronske mreže po pravilu se zasniva na sprovođenju većeg broja iterativnih koraka. Ovo je naročito izraženo kod višedimenzionih relacija gde optimalan skup podataka za obuku obuhvata, kako je navedeno, znatan broj mernih rezultata. Iz istog ovog razloga u vreme i angažman potrebne za razvoj modela treba uključiti i znatnu potrebu za eksperimentalnim ispitivanjima i obradom dobijenih podataka.

Pomenuti nedostatak u pogledu vremena i angažmana na razvoju modela je, međutim, relativne prirode. Kada je faza razvoja gotova i na raspolaganju stoji validan model, vreme uloženo u njegov razvoj može se kompenzovati brzinom njegovog izvršavanja s obzirom na algebarsku prirodu, jednostavne matematičke relacije i odsustvo iteracija pri izvršavanju modela. Takođe, pri razvoju modela njegovi parametri, koje predstavljaju sinaptički koeficijenti, određuju se automatski pri sprovođenju algoritma obuke pa nije potreban poseban postupak parametrizacije modela. Takođe, pošto ovi parametri nemaju fizičko značenje, sa tog aspekta nije neophodna njihova analiza i interpretacija. Ovo se sa druge strane ispoljava u nemogućnosti jednostavne modifikacije modela pri izmeni nekog fizičkog parametra posmatranog sistema. U takvom slučaju neophodno je iz početka sprovesti proces obuke. U opštem slučaju bi, doduše, jednom definisana konfiguracija mreže trebalo da posluži za modeliranje čitave klase srodnih sistema, odnosno pri fizičkim promenama posmatranog sistema koje njegovo ponašanje ne menjaju u kvalitativnom smislu nije neophodno iz početka sprovesti eksperimentalni postupak optimizacije parametara neuronske mreže već samo proces njene obuke.

5. OPIS MERNOG POSTROJENJA

5.1 Konfiguracija mernog postrojenja

Uprošćen prikaz konfiguracije ispitnog postrojenja dat je na slici 16. Stvarni izgled postrojenja prikazan je na slikama 17 i 18.



Slika 16. Konfiguracija ispitnog postrojenja: 1 – ispitivani pneumatik, 2 – ležaj pogonskog vratila točka sa ispitivanim pneumatikom, 3 – noseći ram, 4 – kolica za vođenje točka, 5 – vertikalne vođice nosećeg rama, 6 – pogonski elektromotor sa reduktorom i varijatorom, 7 – šine za vođenje kolica, 8 i 9 – balast za podešavanje vertikalnog opterećenja, 10 – ravna podloga, 11 – element za formiranje neravnina profila podloge, 12 – davač uzdužnog pomicanja sa inkrementalnim enkoderom; $x(t)$ – položaj sistema u uzdužnom pravcu, $z(t)$ – položaj sistema u vertikalnom pravcu



Slika 17. Izgled postrojenja



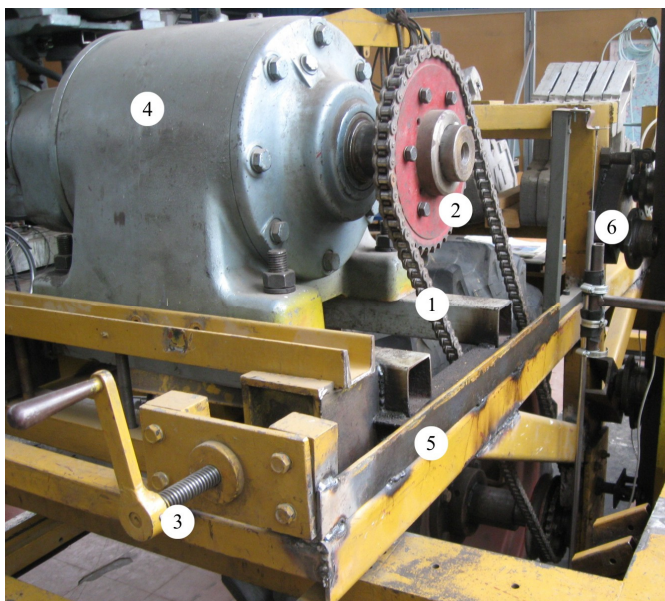
Slika 18. Izgled postrojenja

Točak sa ispitivanim pneumatikom (1) kruto je preko priрубnice spojen sa pogonskim vratilom uležištenim preko ležajeva (2) na nosećem ramu (3). Noseći ram oslonjen je u

odnosu na kolica za vođenje točka (4) preko vertikalnih vođica (5) koje omogućavaju vertikalnu pokretljivost nosećeg rama u odnosu na kolica. Pogon točka ostvaruje se pogonskim lancem (nije ucrtan na slici 16) pomoću elektromotora sa reduktorom i varijatorom (6) montiranih na noseći ram. Šine (7) služe za vođenje kolica. Vertikalno opterećenje točka podešava se postavljanjem ili uklanjanjem određenog broja tegova za balast (8 i 9) postavljenih na noseći ram. Točak se kotrlja po ravnoj čvrstoj podlozi (10) na kojoj mogu u različitim konfiguracijama biti montirane neravnine profila podloge ili singularne prepreke (11). Etape razvoja i rezultati preliminarnih ispitivanja vršenih između ostalog u funkciji probnog rada postrojenja prikazani su u [85] [86] [87] [88] [89].

- Pogonski sistem

Postrojenje dobija pogon putem elektromotora napajanog frekvencijskim pretvaračem. Frekvencijski pretvarač takođe ostvaruje primarno kočenje u normalnim uslovima rada. Snaga pogonskog motora se dalje preko remenog varijatora prenosi na reduktor. S obzirom na postojanje frekvencijskog pretvarača kao primarnog elementa za regulaciju brzine kretanja, varijator se može prema potrebi koristiti za kontinualnu promenu ranga brzina u kojem se postrojenje koristi. Od reduktora se pogon dalje prenosi na pogonsko vratilo odnosno sam ispitni točak putem lančanog prenosiča.



Slika 19. Elementi postrojenja: 1 – pogonski lanac, 2 – pogonski lančanik, 3 – navojno vreteno sa ručicom za zatezanje lanca, 4 – reduktor, 5 – uzdužni klizač, 6 – davač vertikalnog pomeranja

Da bi se pri kvazistatičkim ispitivanjima mogle realizovati brzine kretanja točka dovoljno male da se eliminišu dinamički uticaji, što je potrebno pri ispitivanju kvazistatičke envelope kretanja, predviđena je i mogućnost manualnog pokretanja pogona putem odgovarajućih poluga koje se montiraju na zamajac elektromotora. U takvim uslovima mora se eliminisati mogućnost nehotičnog aktiviranja elektromotora zbog velike opasnosti od nezaštićenih obrtnih delova.

Smeštaj pogonskog sistema direktno na noseći ram u kom je uležišten i sam točak predstavlja ujedno i najpovoljnije rešenje sa stanovišta zatezanja pogonskog lanca, pošto se točak i pogonski sistem kreću u vertikalnom pravcu kao jedna celina. Zatezanje se ostvaruje pomoću dva navojna vretena sa ručicama, pomoću kojih se čitava pogonska grupa translatorno pomera duž klizača u uzdužnom pravcu, slika 19. Problem sa zatezanjem pogonskog lanca, međutim, nije do kraja rešen na zadovoljavajući način. Naime, pri kvazistatičkim uslovima ispitivanja, pri dolasku točka na silazni deo kratkotalasne neravnine, postojanje zazora i elastičnosti mehaničkih komponenata izazivalo je kratkotrajno narušavanje krute kinematičke veze između pogonskog sistema i točka usled dejstva gravitacione sile. Ovaj problem ipak nije uticao na kvalitet i upotrebljivost dobijenih rezultata merenja, s obzirom na način tretmana mernih podataka o čemu će biti reči u odgovarajućem delu rada (tačka 7.2).

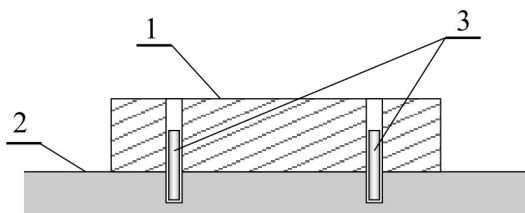
- Dodatni frikcionni kočni sistem

Da bi se povećala bezbednost u radu sa postrojenjem i obezbedila mogućnost pravovremenog kočenja u svim uslovima, postrojenje je, pored frekvencijskog pretvarača koji vrši primarnu funkciju kočenja, dodatno opremljeno i kočnim sistemom sa frikcionim kočenjem napravljenim upotrebom komponenata kočnog sistema putničkog vozila Volkswagen Golf. Kočni disk je montiran na odgovarajuće prilagođeni deo pogonskog vratila, kočna čeljust na noseći ram točka, a glavni kočni cilindar sa jednim blokiranim vodom na kolica za vođenje točka. Aktiviranje glavnog kočnog sistema se vrši manuelno preko poluge za koju se nastojalo da ima što je moguće veću dužinu, kako bi se delimično kompenzovao nedostatak efekta servo uređaja i relativno mali prečnik kočnog diska u odnosu na dimenzije točka i masu sistema.

- Formiranje ispitne podloge

Osnovna funkcija ispitne podloge je ispitivanje filtrirajućeg ponašanja pneumatika na podlozi sa izraženim kratkotalasnim neravninama. Kao jedno od najprihvatljivijih rešenja za ostvarivanje ove funkcije izabrano je formiranje neravnog profila podloge korišćenjem drvenih blokova pravougaonog poprečnog preseka. Ovaj izbor zasnovan je između ostalog i na iskustvima drugih autora, npr. [10] [29] [45] [73] [78] i dr. Jednostavnost upotrebe i niska cena takođe idu u prilog ovakvom pristupu. Odgovarajućim aranžiranjem blokova i podešavanjem njihove prostorne orijentacije moguće je zadovoljiti širok spektar zahteva u pogledu oblika profila podloge i njegovog frekventnog sadržaja.

Osiguranje položaja drvenih blokova za vreme kontakta sa pneumatikom u kotrljanju realizovano je pomoću čeličnih klinova – osovinica koji se umeću u namenske otvore, sa jedne strane u podlozi a sa druge u samom drvenom bloku, slika 20. Postoji po jedan klin sa leve i desne strane, kako bi blokovi, osim protiv translatornog klizanja i naginjanja oko donje poprečne ivice, takođe bili osigurani i protiv okretanja oko vertikalne ose. U podlozi je unapred pripremljen određen broj ravnomerno raspoređenih otvora za umetanje klinova za fiksiranje, što omogućava gradnju raznovrsnih prostornih oblika profila podloge. Izabrani način osiguranja drvenih blokova omogućava njihovu laku manipulaciju u funkciji promene konfiguracije, odnosno veoma jednostavnu zamenu jednog oblika profila podloge drugim.



Slika 20. Veza između elementa za formiranje profila podloge i podloge: 1 – element za formiranje profila podloge (presek normalan na pravac kretanja točka), 2 – podloga, 3 – klinovi za vezu

Završni deo pripreme podloge za eksperimentalna ispitivanja predstavljalo je nanošenje paralelnih linija na ravnomernom međusobnom rastojanju, slika 21. Funkcija ovih linija u boji je pre svega olakšano određivanje geometrijskih parametara profila podloge u slučaju korišćenja složenijih prostornih oblika profila.



Slika 21. Linije za lociranje geometrijskih karakteristika neravnina podloge

Kapacitet postrojenja u pogledu vertikalnog opterećenja točka

U pogledu vertikalnog opterećenja, pri ispitivanjima su korišćene tri konfiguracije, prema tabeli 1. Praktično bi bilo moguće dodavanje još jednog dizaličkog tega čime bi vertikalno opterećenje točka bilo povećano na 1920 daN. Kako, međutim, deklarirana nosivost korišćenog pneumatika iznosi 1510 daN pri pritisku od 2,3 bar [102], od toga se odustalo.

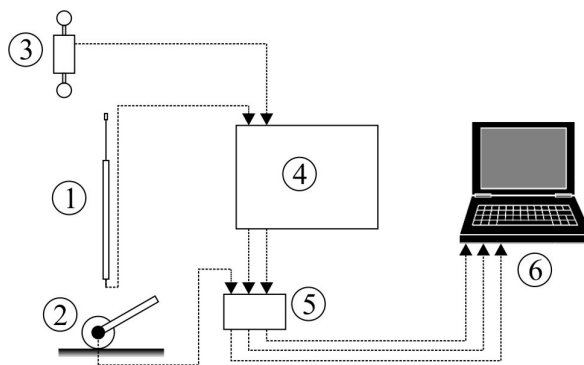
Tabela 1. Vrednosti statičkog vertikalnog opterećenja točka u zavisnosti od montiranih elemenata za balast

Redni broj konfiguracije	Statičko vertikalno opterećenje točka	Opis
1	$G_{T1} = 660 \text{ daN}$	Bez montiranih balasta
2	$G_{T2} = 960 \text{ daN}$	Montiran balast na poziciji 8 (slika 16) – 10 kom. traktorskih tegova od po 30 daN
3	$G_{T3} = 1440 \text{ daN}$	Kao prethodno, sa dodatim balastom na poziciji 9 – dizalički teg od 480 daN

5.2 Merno-akvizicioni sistem

5.2.1 KOMPOZICIJA MERNO-AKVIZICIONOG SISTEMA

Za potrebe proučavanja statičkih i dinamičkih karakteristika pneumatika u vertikalnom pravcu pri pobudi od neravnina podloge neophodno je poznavati zakonitost vertikalnog pomeranja točka za dati profil podloge u vremenskom i prostornom domenu. U svrhu prikupljanja ovih podataka, zadatak merno-akvizicionog sistema je da meri i registruje vertikalni i horizontalni položaj točka u toku vremena, za šta se koriste odgovarajući davači pomeranja. Za merenje vertikalnog pomeranja korišćen je induktivni davač HBM W200, dok je uzdužno pomeranje mereno putem davača zasnovanog na inkrementalnom enkoderu HEDSS ISC3806. Pošto je, u pogledu vertikalnog pomeranja, reč o oscilatornom sistemu sa jednim stepenom slobode tj. jednoj elastično oslonjenoj masi koja može da osciluje u vertikalnom pravcu, dinamička komponenta vertikalne sile u kontaktu točka i podloge dobija se tako što se signal vertikalnog ubrzanja (odnosno drugi izvod signala vertikalnog pomeranja po vremenu) pomnoži sa masom sistema. Stoga za data ispitivanja nije neophodno koristiti zasebni davač sile. Merenje sile vršeno je pomoću merne ćelije HBM RSCA C3/5t u okviru posebnih ispitivanja za određivanje mehaničkih karakteristika pneumatika, tačnije pri utvrđivanju zavisnosti između vertikalne sile i defleksije odnosno dužine kontaktne površine. Signali vertikalnog i uzdužnog pomeranja uvode se u univerzalno višekanalno analogno merno pojačalo HBM KWS 673.A2 a nakon toga u višenamenski modul za akviziciju podataka NI USB-6210. Iz modula za akviziciju signal se uvodi u PC računar gde se pomoću odgovarajućeg mernog softvera vrši prikaz trenutne vrednosti i memorisanje rezultata merenja. Kratak opis i najvažnije karakteristike navedenih komponenata date su u nastavku teksta. Šematski prikaz merno-akvizicionog sistema sa tokom signala dat je na slici 22. Sve komponente mernog sistema smeštene su na merna kolica za vođenje ispitnog točka (pozicija 4, slika 16).



Slika 22. Šema merno akvizicionog sistema: 1- induktivni davač pomeranja HBM W200 za merenje vertikalnog položaja sistema, 2- davač sa inkrementalnim enkoderom HEDSS ISC3806 za merenje uzdužnog položaja, 3- merna ćelija HBM RSCA C3/5t za određivanje vertikalnog opterećenja točka, 4- univerzalno merno pojačalo HBM KWS 673.A2, 5- Višefunkcionalna USB kartica za akviziciju i A/D konverziju signala NI USB-6210

5.2.2 DAVAČ VERTIKALNOG POMERANJA

Davač vertikalnog pomeranja (slika 23) korišćen je za utvrđivanje vertikalnog položaja sistema u vremenu, $z(t)$ (slika 16). Karakteristike davača su sledeće:

Vrsta: induktivni davač pomeranja sa kotvom

Marka i tip: HBM W 200

Merni opseg ± 200 mm

Osetljivost: 80 mV/V

klasa tačnosti: 0,4 %



Slika 23. Induktivni davač pomeranja sa kotvom HBM W 200

5.2.3 DAVAČ UZDUŽNOG POMERANJA

Davač uzdužnog pomeranja korišćen je za utvrđivanje uzdužnog položaja sistema u vremenu ($x(t)$, slika 16). Davač je zasnovan na inkrementalnom enkoderu (slika 24) na koji se prenosi obrtanje posebnog mernog točka (pozicija 12, slika 16). Merni točak je montiran na nosač koji je zglobno vezan za merna kolica za vođenje ispitnog točka. Prilikom kretanja kolica, merni točak se kotrlja bez klizanja po jednoj od šina za vođenje mernih kolica. Broj obrtaja enkodera time je direktno proporcionalan pređenom putu, pri čemu se

uzima u obzir i smer kretanja tako da se i pri naizmeničnom kretanju mernih kolica napred i nazad uvek dobija tekuća koordinata kao trenutna razdaljina u odnosu na polaznu poziciju, sa pozitivnim ili negativnim predznakom. Karakteristike enkodera su sledeće:

Vrsta:..... rotacioni inkrementalni enkoder

Marka i tip:..... HEDSS ISC3806-401E2000BZ1-5-24F

Rezolucija:..... 2000 imp/ob



Slika 24. Rotacioni inkrementalni enkoder HEDSS

5.2.4 DAVAČ SILE

Davač sile, za razliku od ostalih komponenata merno-akvizicionog sistema prikazanih u ovom poglavlju, ne predstavlja stalni deo konfiguracije mernog postrojenja. Korišćen je jedino pri ispitivanjima zavisnosti opterećenja točka i defleksije odnosno kontaktne dužine (tačka 6.2). Za obezbeđivanje aksijalnog dejstva sile ista se uvodi preko sfernih zglobova. Izgled davača prikazan je na slici 25. Karakteristike davača su sledeće:

Vrsta:..... merna ćelija za merenje mase /davač sile za zatezanje i pritisak, na bazi mernih traka

Marka i tip:..... HBM RSCA C3/5t

Nazivno opterećenje: .. 5000 kg

Nazivna osetljivost: 2 mV/V

Klasa tačnosti prema OIML R 60: C3 (broj podela: 3000)



Slika 25. Merna ćelija HBM RSCA C3/5t

5.2.5 AKVIZICIJA I REGISTROVANJE MERNIH PODATAKA

Naponski signali induktivnog davača pomeranja i merne ćelije uvođeni su u analogno univerzalno merno pojačalo HBM KWS, slika 26. Važnije karakteristike mernog pojačala su sledeće:

Vrsta: univerzalno analogno merno pojačalo za senzore na bazi mernih traka, potencijometarske senzore i induktivne senzore

Marka i tip: HBM KWS 673.A2

Broj kanala: 6

Noseća frekvencija: 5 kHz \pm 1 %

Napon napajanja mosta: 1; 2.5; 5 V

Izlaz: \pm 10 V

Frekventni opseg (interna promena): 0 do 1000 Hz



Slika 26. Analogno univerzalno merno pojačalo HBM KWS 673.A2

Digitalizacija analognih signala davača sile i pomeranja nakon izlaza iz mernog pojačala, kao i prijem digitalnog signala enkodera, vrše se pomoću višefunkcionalne USB kartice za

akviziciju i A/D konverziju signala sa 16 analognih i 4 digitalna kanala, slika 27. Signali se nakon akvizicione kartice uvode u PC računar gde se dalje obrađuju i memorišu. Osnovne karakteristike su:

Vrsta: akviziciona kartica

Marka i tip: National Instruments NI USB-6210

Broj kanala: 16 analognih ulaza, 4 digitalna I/O

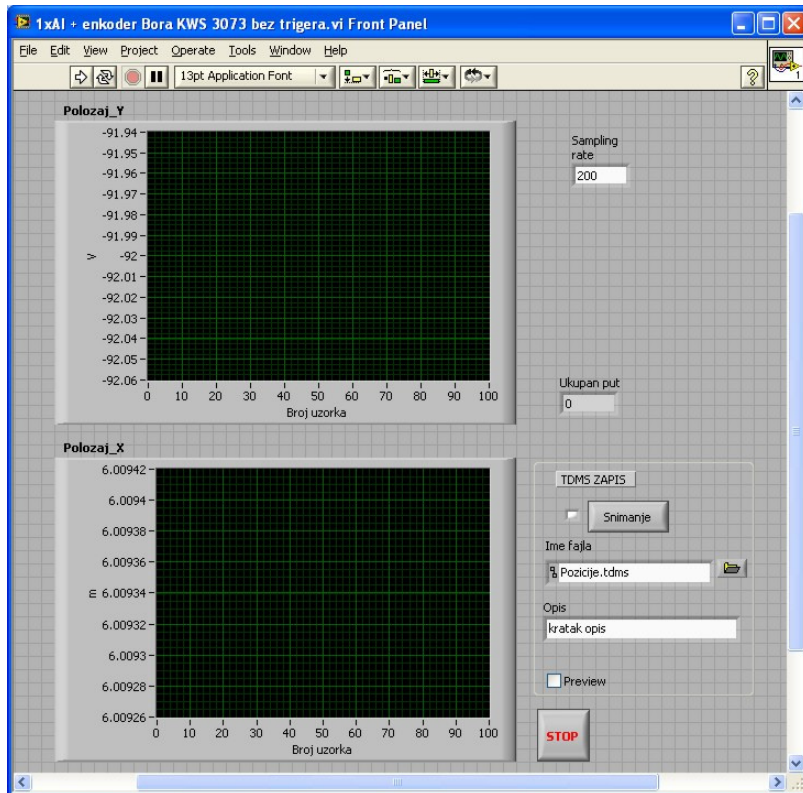
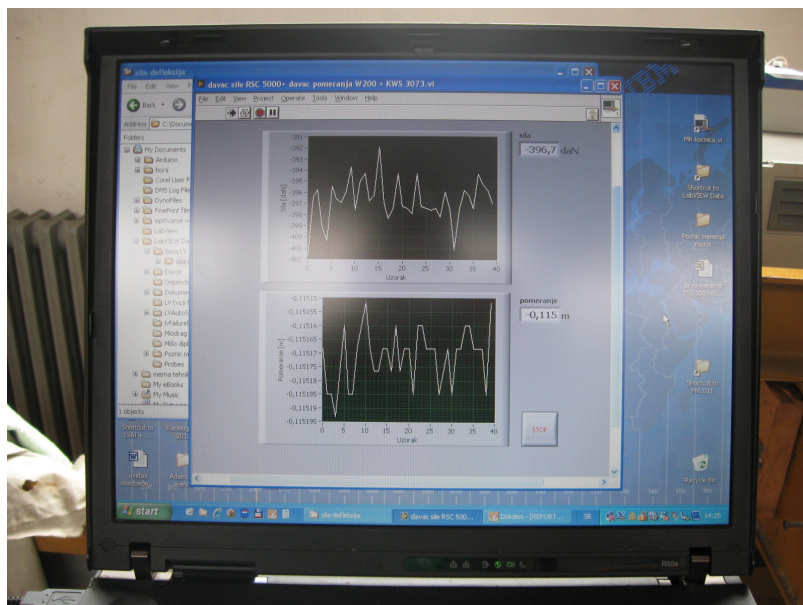
Rezolucija: 16 bit

Frekvencija uzorkovanja: 250 kHz



Slika 27. Akviziciona kartica National Instruments NI USB-6210

Kao računarski softver za komunikaciju sa akvizicionom karticom, obradu i memorisanje podataka i komunikaciju sa korisnikom u funkciji upravljanja ovim procesima korišćeni su namenski programi razvijeni u okviru softverskog okruženja NI LabView. Primeri izgleda grafičkog interfejsa za komunikaciju sa korisnikom prikazani su na slici 28.



Slika 28. Primeri izgleda grafičnog interfejsa za komunikacijo sa korisnikom pri izvođenju merjenja

5.3 Ispitni pneumatik

Za izvođenje merenja korišćen je pneumatik radijalne konstrukcije dimenzija 12.4R28:

PIRELLI Cinturato TM 200 ★121 A8 (ekvivalentno sa 8 P.R.)

Karakteristike pneumatika su sledeće [102]:

Indeks opterećenja 121 \Rightarrow nazivna nosivost 1450 daN

Indeks brzine A8 \Rightarrow dopuštena brzina 40 km/h

Slobodni radijus $R_0 = 625$ mm

Obim kotrljanja $O_K = 3710$ mm

Nosivost u funkciji pritiska

Pritisak [bar]	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3
Nosivost [daN]	1050	1140	1185	1230	1275	1320	1400	1435	1510

6. UTVRĐIVANJE OSNOVNIH MEHANIČKIH PARAMETARA ISPITNOG PNEUMATIKA

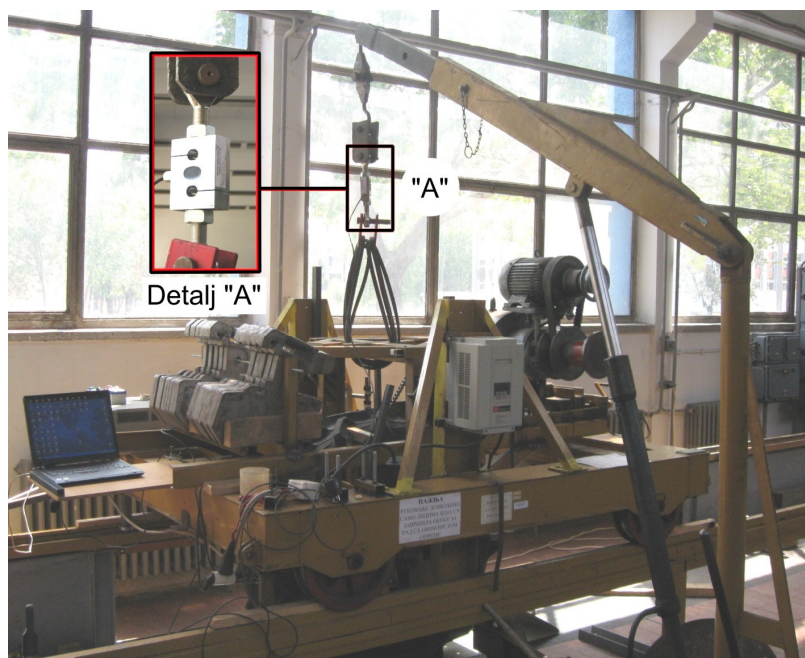
6.1 Uvodna razmatranja

Kvazistatička envelope kretanja traktorskog pneumatika podrazumeva deformacije pneumatika pod dejstvom spoljnih opterećenja. U funkciji eksperimentalnog izučavanja kvazistatičke envelope i njenih svojstava, neophodno je prethodno utvrditi osnovne mehaničke i geometrijske pokazatelje ispitivanog pneumatika. Ove veličine treba da posluže kao ulazni parametri koji određuju karakteristike kvazistatičke envelope koje su od interesa u ovom radu. Takođe, pri sveobuhvatnijem tretiranju ponašanja pneumatika one predstavljaju neophodne podatke s obzirom na to da pružaju osnovne informacije o ponašanju elastične strukture pneumatika. Svojstva odnosno parametri pneumatika koji će biti ispitivani u ovom delu rada su:

- zavisnost između vertikalnog opterećenja i statičke defleksije pneumatika na ravnoj tvrdoj podlozi,
- linearizovana krutost pneumatika,
- linearizovano prigušenje pneumatika,
- geometrijska zavisnost između statičke defleksije i dužine zone kontakta pneumatika i podloge, i
- uticaj pritiska vazduha u pneumatiku na navedene veličine.

6.2 Postupak merenja vertikalnog opterećenja i defleksije pneumatika

U posmatranom eksperimentu vršena su merenja u funkciji utvrđivanja zavisnosti između vertikalne defleksije odnosno dužine kontaktne površine i statičkog vertikalnog opterećenja pneumatika, sa pritiskom kao promenljivim parametrom. U postupku merenja defleksije i vertikalnog opterećenja, korišćeni su davač sile i davač vertikalnog pomeranja pri čemu su vrednosti mernih veličina praćene i snimane putem odgovarajućeg mernog softvera. Davač sile postavljen je između nosećeg rama sa ispitnim pneumatikom i kuke hidraulične dizalice, slika 29.



Slika 29. Merenje defleksije i vertikalnog opterećenja pneumatika

U početnoj poziciji, davač sile je bio rasterećen, tako da je celokupna težina sistema prenošena na podlogu preko pneumatika. Pneumatik je u tom režimu dakle opterećen maksimalnom vertikalnom silom za datu konfiguraciju sistema. Potom je, postepenim angažovanjem ručne dizalice, vršeno izdizanje konstrukcije tj. smanjenje defleksije pneumatika, povećavajući udeo težine sistema koji se prenosi na davač, odnosno u istoj meri smanjujući statičku reakciju između točka i podloge. Izdizanje konstrukcije vršeno je do trenutka kada je davač opterećen ukupnom težinom sistema, što znači da u tim uslovima vertikalna reakcija podloge postaje jednaka nuli. Pri tome je očitana vrednost signala pomeranja koja predstavlja referentnu vrednost položaja za nultu defleksiju. Nakon toga vršeno je postupno rasterećivanje sistema u nizu sukcesivnih koraka, pri čemu je nakon svakog koraka vertikalno opterećenje točka izračunavano na osnovu izraza:

$$G_T = G_{TMAX} - G_D \dots \dots \dots (8.)$$

G_T [N]..... – aktuelna vrednost statičkog vertikalnog opterećenja pneumatika;

G_{TMAX} [N]... – maksimalno opterećenje pneumatika odn. težina koja se prenosi na podlogu pri potpuno rasterećenom davaču;

G_D [N]..... – opterećenje davača sile.

Defleksija je pri svakom koraku izračunavana iz jednakosti:

$$f_z = z_0 - z \dots\dots\dots(9.)$$

f_z [m].....– aktuelna vrednost vertikalne defleksije pneumatika;

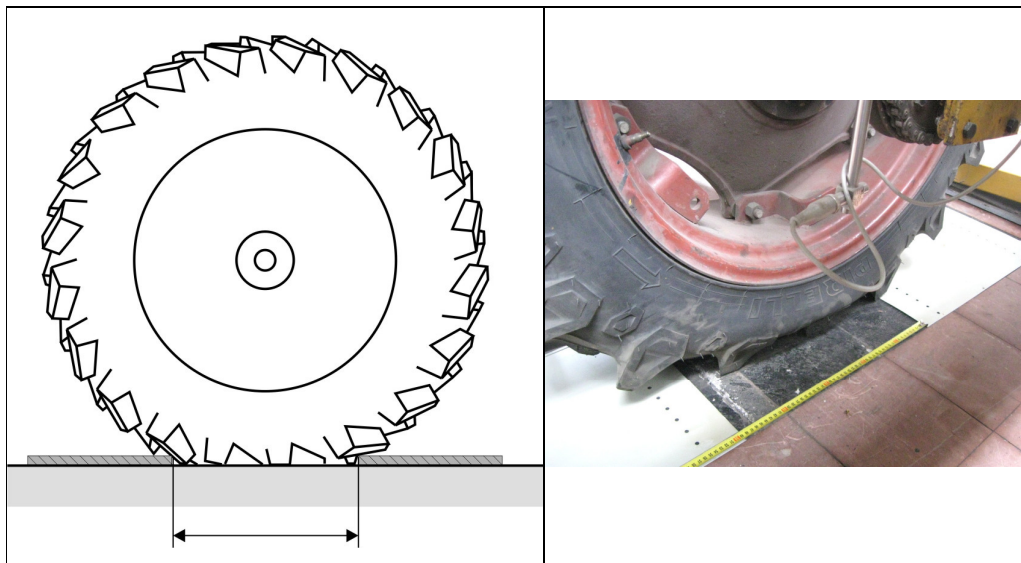
z_0 [m].....– referentna vrednost položaja pri nultoj defleksiji;

z [m]– aktuelna vrednost položaja sistema.

Promena defleksije vršena je veoma postupnim (kvazistatičkim) izdizanjem odnosno spuštanjem dizalice pri neprekidnoj akviziciji podataka pri čemu je frekvencija uzorkovanja iznosila 100 Hz. Opisanim postupkom dobijene su krive zavisnosti između vertikalnog opterećenja i defleksije pneumatika u formi niza diskretnih vrednosti pogodnog za dalju obradu pomoću računarskog softvera za tabelarna izračunavanja. Postupak je sproveden pri vrednostima pritiska od 0.8, 1.1, 1.4, 1.7 i 2.0 bar. Da bi se merenjem mogao obuhvatiti što širi spektar vertikalnih opterećenja, a usled ograničene nosivosti hidraulične dizalice, merenja su vršena pri sve tri konfiguracije mernog sistema sa aspekta vertikalnog opterećenja prema tabeli 1, odnosno pri osnovnim opterećenjima od 660 daN (bez dodatnog balasta), 960 daN (balast sa 10 traktorskih tegova) i 1440 daN (balast sa 10 traktorskih i jednim dizaličkim tegom.)

6.3 Postupak merenja dužine kontaktne površine

Merenje dužine kontaktne površine vršeno je pomoću dve ploče od čeličnog lima male debljine, širine veće od širine gazećeg sloja pneumatika. Odgovarajuća ivica svake ploče prostorno je orijentisana tako da leži normalno u odnosu na pravac kretanja pneumatika, i potom prislonjena uz najjistureniju tačku prednjeg odnosno zadnjeg dela kontaktne površine. S obzirom na malu debljinu ploče, može se smatrati da je greška koja nastaje usled kontakta gornje ivice ploče sa rebrom pneumatika praktično zanemarljiva. Drugi izvor greške merenja pri ovom postupku može biti elastična deformacija rebra pri kontaktu sa ivicom ploče. Pošto je, međutim, kontaktna sila između rebra i ploče relativno mala (dovoljno je da se samo ostvari kontakt, bez neophodnosti realizacije velikog površinskog pritiska), sledi da će i odgovarajuća deformacija biti male veličine pa se uticaj i ovog izvora greške može smatrati zanemarljivim. Opisani postupak merenja dužine kontaktne površine prikazan je na slici 30. U istraživanju [27] utvrđeno je da slučajne varijacije položaja gazećeg sloja imaju marginalan uticaj na dužinu kontaktne površine, na osnovu čega je zaključeno da nije neophodno sprovoditi ponovljena merenja u različitim položajima pneumatika. Izmerene vrednosti dužine kontaktne površine registrovane su za niz različitih vrednosti defleksija, pri čemu je registrovana i odgovarajuća vrednost vertikalnog opterećenja. Menjanje vrednosti vertikalne defleksije odnosno statičkog opterećenja vršeno je pomoću hidraulične dizalice na način opisan prethodnoj tački. Varijacije pritiska i konfiguracije postrojenja u pogledu osnovnog vertikalnog opterećenja takođe odgovaraju onima navedenim u istom delu rada.



Slika 30. Postupak merenja dužine kontaktne površine: šematski prikaz i stvarni izgled

6.4 Postupak utvrđivanja linearizovane krutosti

Ukoliko se promene statičkog vertikalnog opterećenja točka posmatraju u dovoljno širokim granicama, kriva zavisnosti defleksije od opterećenja pneumatika ispoljava nelinearni karakter. Ova činjenica je navedena u brojnim literaturnim izvorima (npr. [92]) a takođe potvrđena eksperimentalnim merenjima sprovedenim u okviru ovog rada.

Međutim, u zoni nazivnog opterećenja pneumatika pri ograničenim fluktuacijama dinamičke reakcije podloge, nelinearnost je obično relativno slabo izražena pa se odnos između priraštaja vertikalne sile i odgovarajućeg priraštaja radijalne defleksije može tretirati kao konstanta jednaka koeficijentu krutosti. Ovaj pristup je često korišćen u modeliranju elastične strukture pneumatika. U okviru predmetnih eksperimenata, konstatovano je da pri vertikalnim opterećenjima većim od približno 400 daN zavisnost između vertikalnog opterećenja i defleksije ima tok koji se može smatrati linearnim, što je usvojeno kao jedan od kriterijuma za izračunavanje koeficijenta krutosti, prema izrazu:

$$c = \frac{G_T}{f} \dots\dots\dots(10.)$$

- c [N/m] – linearizovana krutost pneumatika
- G_T [N]..... – vertikalno opterećenje
- f [m]..... – radijalna defleksija

Osim na osnovu snimljene statičke zavisnosti između vertikalnog opterećenja i defleksije, linearizovana krutost je takođe izračunata na osnovu dijagrama sopstvenih prigušenih oscilacija u vremenu. Ova merenja su vršena pre svega u funkciji određivanja linearizovanog prigušenja pneumatika (tačka 6.5) metodom logaritamskog dekrementa. Naime nakon određivanja vrednosti logaritamskog dekrementa δ i koristeći veličinu kvaziperioda prigušenih oscilacija T_D očitane sa dijagrama oscilacija u vremenu (slika 31), sopstvena frekvencija slobodnih oscilacija sistema dobija se iz izraza:

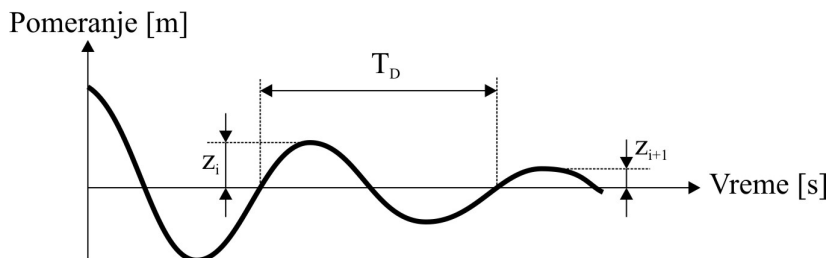
$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2 + \delta^2} \dots\dots\dots(11.)$$

ω_0 [s^{-1}] – sopstvena kružna frekvencija slobodnih oscilacija
 T_D [s] – kvaziperiod prigušenih oscilacija
 δ [s^{-1}] – logaritamski dekrement

Nakon određivanja veličine ω_0 , krutost c se može izračunati iz izraza:

$$c = m \cdot \omega_0^2 \dots\dots\dots(12.)$$

m [kg] – oscilatorna masa



Slika 31. Dijagram prigušenih oscilacija: T_D – kvaziperiod prigušenih oscilacija, z_i i z_{i+1} – dva susjedna maksimuma položaja nakon isteka jednog kvaziperioda

6.5 Postupak utvrđivanja linearizovanog prigušenja pneumatika metodom logaritamskog dekrementa

Prigušne karakteristike pneumatika nisu od interesa u okviru statičkog i kvazistatičkog ponašanja pneumatika, ali predstavljaju jedan od ključnih parametara dinamičkog ponašanja elastične strukture. Prigušne karakteristike pneumatika ispoljavaju, s obzirom na to da primarno zavise od viskoelastičnih efekata, kompleksne forme ponašanja uključujući nelinearnost i frekventnu zavisnost. Eksperimentalna ispitivanja takođe pokazuju da prigušenje pneumatika zavisi i od brzine kotrljanja (npr. [45], [56] i dr.). Ukoliko se, međutim, ponašanje pneumatika razmatra u dovoljno ograničenom spektru eksploatacionih

uslova, prigušenje se može sa zadovoljavajućom tačnošću aproksimirati modelom viskoznog prigušenja kod koga je prigušna sila linearno proporcionalna prvom izvodu defleksije u vremenu odnosno brzini radijalne deformacije pneumatika. Kako detaljnije izučavanje i modeliranje fenomena koji uslovljavaju prigušenje pneumatika nije u fokusu ovog rada, to će i ovde biti usvojen ovaj pojednostavljeni pristup. S obzirom na to, za određivanje koeficijenta prigušenja odabran je metod logaritamskog dekrementa. Ispitivanja su vršena tako da je pneumatik pomoću hidraulične dizalice izdignut na određenu visinu u odnosu na podlogu a potom mu je naglim otpuštanjem ventila hidraulične dizalice saopštena početna brzina čime je doveden u oscilatorno kretanje. Istovremeno je usled savitljive veze prekinuta kinematička veza između hidraulične dizalice i pneumatika, čime je eliminisan uticaj prigušenja u hidrauličnom sistemu dizalice na rezultate merenja. Logaritamski dekrement se na osnovu veličina očitanih sa dijagrama izračunava na osnovu izraza:

$$\delta = \frac{1}{T_D} \cdot \ln \frac{z_i}{z_{i+1}} \dots\dots\dots(13.)$$

δ [s^{-1}] – logaritamski dekrement

z_i i z_{i+1} [m] – dva susedna maksimuma položaja nakon isteka jednog kvaziperioda (slika 31)

Nakon određivanja logaritamskog dekrementa δ , koeficijent prigušenja k se može izračunati iz izraza:

$$k = 2 \cdot \delta \cdot m \dots\dots\dots(14.)$$

k [kg/s]..... – koeficijent prigušenja

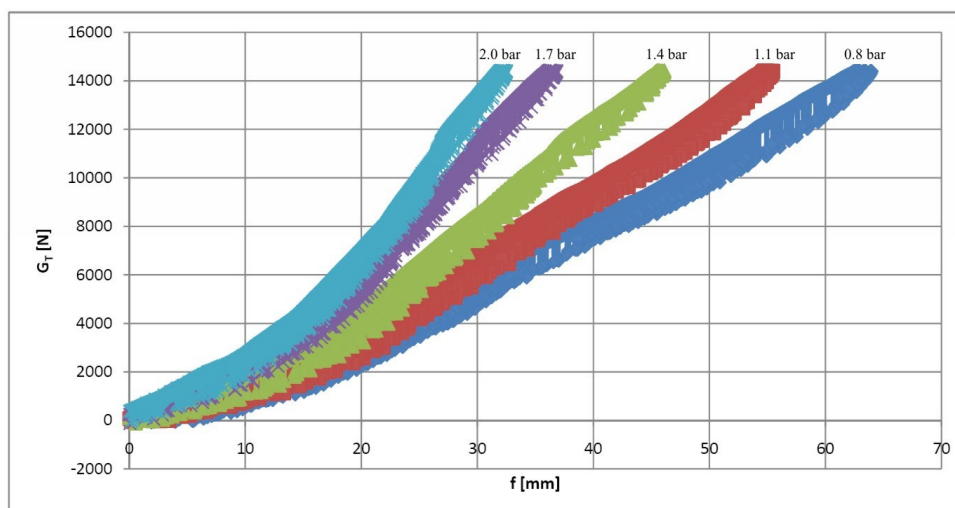
Ispitivanja su vršena za točak pri njegovom konstantnom položaju po podužnoj osi odnosno bez kotrljanja. Iako se vrednosti prigušenja pneumatika u mirovanju i onog u kotrljanju razlikuju, za odabrani pristup postoji opravdanje. Naime, karakteristike mernog postrojenja su takve da nije moguće postići brzine kretanja pri kojima navedeni uticaj brzine kotrljanja u značajnijoj meri dolazi do izražaja. Takođe, iskustva drugih autora (npr. [45], [78]) ali i sopstvena iskustva stečena u preliminarnom radu sa ispitnim postrojenjem ukazuju na to da kod kotrljajućeg točka nastaju tolika rasipanja rezultata da metod logaritamskog dekrementa postaje praktično nemoguće primeniti⁹. Usvojeni način određivanja prigušenja je takođe korišćen i u radu [21]).

⁹ Razlozi za ovo bi mogli biti geometrijska odstupanja okruglosti pneumatika, fluktuacije krutosti pneumatika u radijalnom pravcu, nepravilnosti geometrije profila podloge, delimično stohastički karakter viskoelastičnog prigušenja itd.

6.6 Prikaz i analiza rezultata merenja

6.6.1 ZAVISNOST VERTIKALNE SILE I DEFLEKSIJE

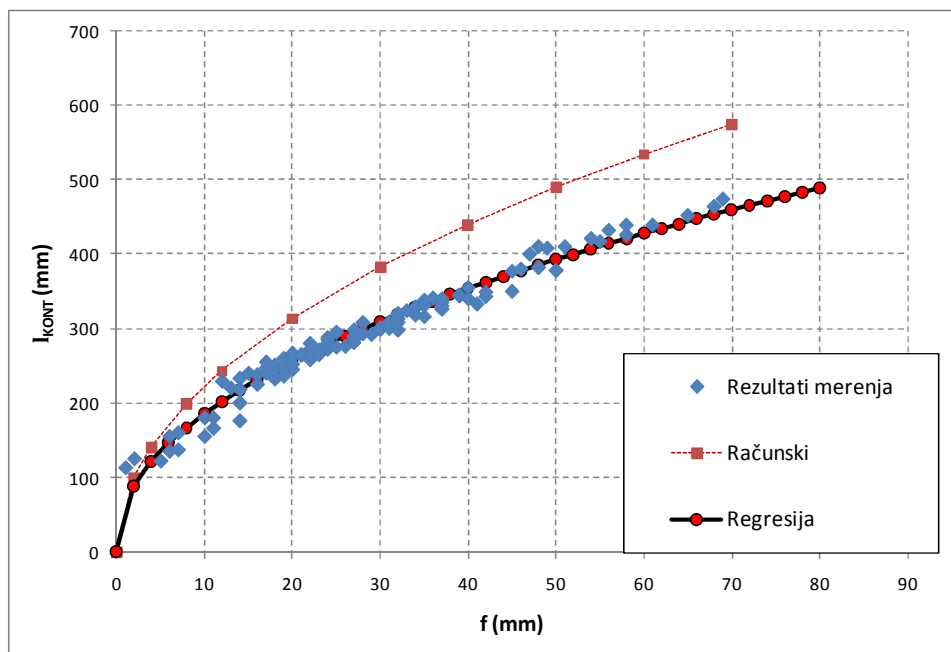
Zavisnost između vertikalnog opterećenja točka G_T [N] i defleksije f [mm] prikazana je grafički na dijagramu na slici 32. Dijagram pokazuje da je pri malim opterećenjima porast sile sa porastom defleksije progresivnog karaktera. Ovakav karakter krive je očekivan, pre svega zato jer se sa povećanjem defleksije povećava i dužina zone kontakta između pneumatika i podloge, a time i udeo mehaničke strukture pneumatika izložen deformaciji. Na dijagramu se, dalje, može uočiti da se u zoni većih defleksija odnosno opterećenja njihova međusobna zavisnost može tretirati kao linearna za sve vrednosti pritiska. Zona linearnosti kod svih pritisaka počinje približno na 4000 N. S obzirom na uobičajeni nivo vertikalnih opterećenja traktorskog točka, na osnovu prikazanih rezultata može se doneti zaključak o opravdanosti usvajanja krutosti pneumatika kao konstantne veličine. U slučaju pojave intenzivnijih dinamičkih fluktuacija vertikalne reakcije, odnosno znatnijim varijacijama defleksije uključujući i male vrednosti, korišćenje ovog principa bi narušilo tačnost analize.



Slika 32. Zavisnost između vertikalnog opterećenja točka G_T [N] i defleksije pneumatika f [mm] u statičkim uslovima, pri različitim vrednostima pritiska

6.6.2 ZAVISNOST IZMEĐU KONTAKTNE DUŽINE I DEFLEKSIJE / VERTIKALNOG OPTEREĆENJA

Rezultati ispitivanja zavisnosti između kontaktne dužine pneumatika i defleksije prikazani su na slici 33.



Slika 33. Zavisnost između kontaktne dužine l_{KONT} [mm] i defleksije pneumatika f [mm]

Prema očekivanjima, veza između defleksije i kontaktne dužine je isključivo geometrijske prirode, odnosno ne zavisi od eksploatacionih parametara pneumatika. Izvan područja veoma malih defleksija (koje odgovaraju malim vertikalnim opterećenjima odnosno uslovima bliskim gubitku kontakta između točka i podloge), relacija se može aproksimirati linearnim trendom iskazanim sledećom regresionom relacijom:

$$l_{KONT} = 5.141 \cdot f + 143.0 \dots\dots\dots (15.)$$

l_{KONT} [mm]..... – kontaktna dužina

f [mm]..... – defleksija

U okviru dijagrama na slici 33 su takođe prikazani rezultati približnog izračunavanja kontaktne dužine na osnovu defleksije ako se usvoji da oblik dela pneumatika koji nije u kontaktu sa podlogom ne odstupa od pravilnog kružnog luka. Tada važi [68]:

$$l_{\text{KONT}} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_0 \cdot f - f^2} \dots\dots\dots(16.)$$

R_0 – slobodni radijus pneumatika

Za defleksije veće od ~10 mm, rezultati računskog modela prema (16) odstupaju od linearnog trenda između 15% i 29%, što se može oceniti kao veliko odstupanje. Opravdano je pretpostaviti da ova odstupanja potiču u najvećoj meri od neuzimanja u obzir savojne krutosti oboda pneumatika. Njen uticaj dovodi do odstupanja oblika segmenta pneumatika u zoni kontakta sa podlogom od kružnog luka. Međutim, s obzirom na jednostavnost primene ove relacije, a naročito na njenu opštost, u daljem radu može biti od interesa da se ispita uticaj njenog korišćenja na sveukupnu tačnost modela u čijem kontekstu ista može biti upotrebljena.

Za područja malih opterećenja odnosno malih defleksija, (ispod ~10 mm), linearni trend ustanovljen relacijom (15) očigledno nije primenljiv. U ovom režimu za opisivanje zavisnosti između defleksije i kontaktne dužine pogodnije je koristiti analitički izraz (16).

Iako relacije (15) i (16) ne opisuju zavisnost kontaktne dužine pneumatika u celokupnom spektru eksploatacionih uslova na adekvatan način, u određenim uslovima ih je prikladno koristiti. Međutim, takođe je prikladno formulisati jedinstvenu matematičku relaciju koja opisuje ovu zavisnost u celokupnom posmatranom dijapazonu. Kombinujući rezultate analitičkog rešenja (16) pri malim defleksijama sa rezultatima merenja pri većim vrednostima defleksije, uspostavljena je sledeće empirijska zavisnost:

$$l_{\text{KONT}} = 63.3 \cdot f^{0.4664} \dots\dots\dots(17.)$$

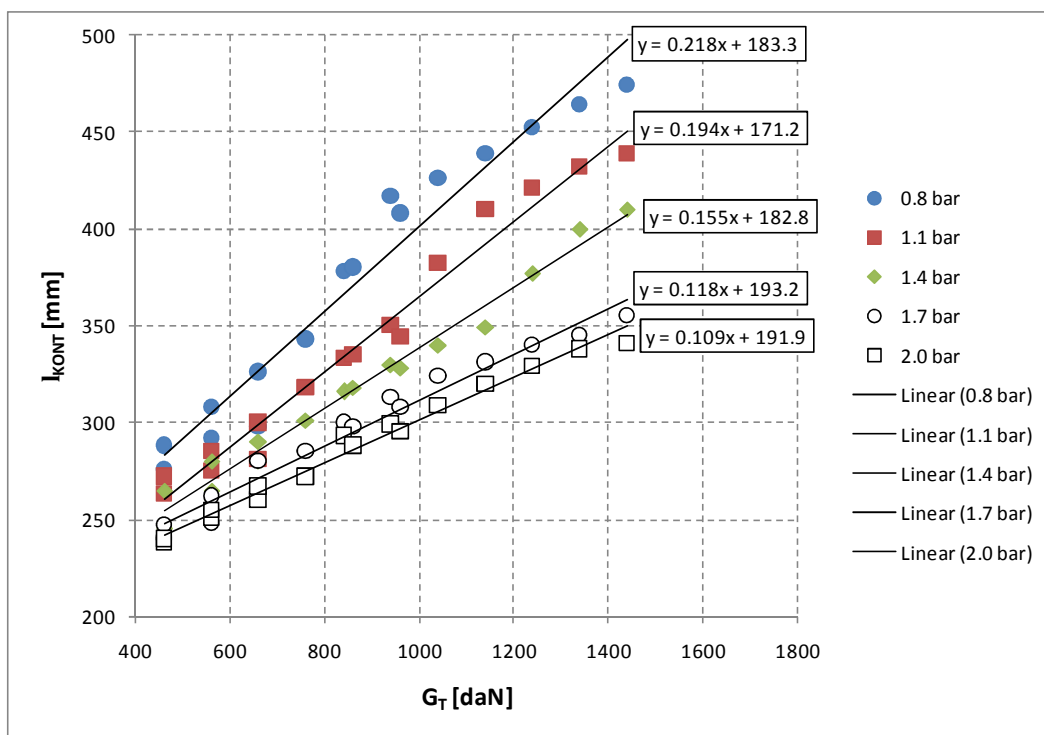
l_{KONT}, f - [mm]

Zbog uticaja vertikalnog opterećenja točka G_T na kontaktnu dužinu l_{KONT} , u funkciji razvoja modela envelope kretanja koji uzima u obzir promenljive karakteristike filtriranja geometrije podloge usled fluktuacija G_T i posledičnih promena l_{KONT} , potrebno je poznavati zavisnost $l_{\text{KONT}} = l_{\text{KONT}}(G_T)$. U uspostavljanju matematičkog izraza za definisanje ove relacije pošlo se od pretpostavke da se defleksija može izračunati kao odnos izmerenog vertikalnog opterećenja i linearizovane krutosti, a potom, koristeći relacije (15) odnosno (16) odrediti kontaktna dužina. Praktična provera ove pretpostavke (čiji je prikaz ovde izostavljen), međutim, pokazala je da ovako dobijene računске vrednosti defleksije pretežno odstupaju od stvarno izmerenih za približno 20 do 30%. Do ovog odstupanja dolazi pre svega zbog prenebregavanja nelinearnosti u zavisnosti između opterećenja i defleksije pri malim vrednostima ovih parametara. Linearizovana krutost uzima u obzir samo priraštaj sile po defleksiji u zoni linearnosti, ne vodeći računa o apsolutnom položaju posmatranog dela krive u odnosu na koordinatni početak.

Sledeći korak u nastojanju da se uspostavi zadovoljavajuće tačna funkcionalna zavisnost između vertikalnog opterećenja i defleksije učinjen je proverom mogućnosti da se iskoriste iskustva drugih autora u empirijskom modeliranju ove relacije. U radu [59] prikazani su rezultati istraživanja vršenih u funkciji uspostavljanja empirijskih relacija između defleksije sa jedne, i konstruktivnih odnosno eksploatacionih (opterećenje i pritisak)

parametara pneumatika sa druge strane [35] [70] [77] [97]. U radu [59] je potom izvršena praktična provera tačnosti ovih modela za isti pneumatik koji je korišćen i u ovom radu. Rezultati su, međutim, pokazali da su odstupanja rezultata modela od izmerenih vrednosti u kontekstu ovog rada neprihvatljivo velika.

S obzirom na prirodu istraživanja, u daljem radu se odustalo od funkcionalnog povezivanja defleksije i vertikalnog opterećenja¹⁰. Umesto toga, odlučeno je da se na osnovu rezultata merenja direktno povežu kontaktna dužina i vertikalno opterećenje, jer uspostavljanje njihove međuzavisnosti i jeste cilj ovog dela rada.



Slika 34. Zavisnost kontaktne dužine l_{KONT} [mm] od vertikalnog opterećenja G_T [daN] za različite vrednosti pritiska i aproksimacije linearnim trendovima

Jedna mogućnost za uspostavljanje tražene zavisnosti je njena aproksimacija linearnim trendom na ograničenom intervalu vrednosti vertikalne sile, prema dijagramu na slici 34. U okviru dijagrama su takođe prikazane i jednačine linearne regresije za modeliranje posmatrane zavisnosti.

Ukoliko se želi posmatranje šireg spektra dejstva vertikalnih opterećenja, ograničenje na linearnu zonu zavisnosti prikazano na slici 34 predstavlja nedostatak. Pri uspostavljanju adekvatnije relacije pošlo se od empirijskog izraza Zegelaar-a [98]:

¹⁰ Karakter zavisnosti vertikalne sile i defleksije pri konstantnom pritisku ukazuje na to da bi za matematičku aproksimaciju njihove relacije mogao da bude pogodan npr. polinom kvadratnog ili višeg stepena. Ovakva relacija bi, međutim, zakomplikovala jednoznačno numeričko određivanje defleksije na osnovu zadatog vertikalnog opterećenja. Da bi se izbeglo preveliko udaljavanje od centralne teme istraživanja, ovakav pristup nije sproveden.

$$a = q_{a2} \cdot G_T + q_{a1} \cdot G_T^{1/2} \dots\dots\dots (18.)$$

a..... – polovina kontaktne dužine

G_T – vertikalno opterećenje točka

q_{a1} , q_{a2} – regresioni koeficijenti

U ovom radu, izraz (18) je proširen tako da obuhvati i pritisak kao parametar. Umesto za polovinu kontaktne dužine, na koju se odnosi gornji izraz, za potrebe ovog rada smatrano je prikladnijim da se izraz direktno poveže sa l_{KONT} . Formirana funkcionalna zavisnost ima oblik:

$$l_{KONT} = c_1 \cdot \frac{G_T}{p^{cp1}} + c_2 \cdot \frac{\sqrt{G_T}}{p^{cp2}} \dots\dots\dots (19.)$$

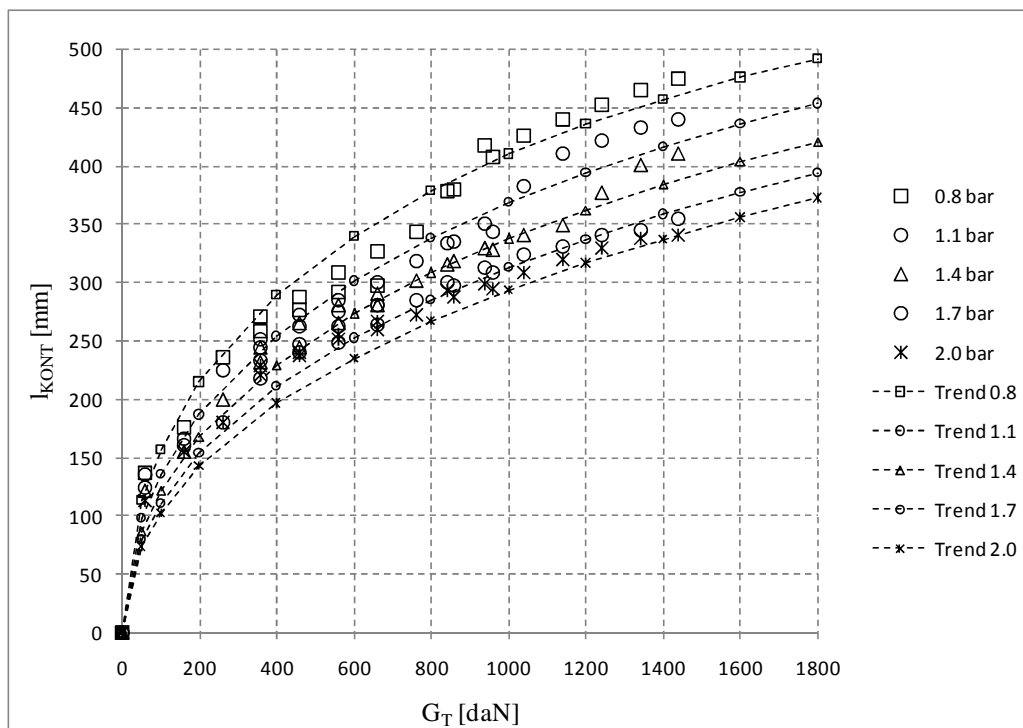
l_{KONT} [mm], G_T [daN], p [bar]

c_1 , c_2 , c_{p1} , c_{p2} – regresioni koeficijenti

Vrednosti regresionih koeficijenata iz izraza (19) određene su tako da funkcionalna zavisnost sa najmanjom greškom opisuje stvarne rezultate merenja. Optimalne vrednosti koeficijenata, određene eksperimentalnim putem, prikazane su u tabeli 2. Aproksimacione krive i njihovo poređenje sa izmerenim rezultatima prikazane su na slici 35

Tabela 2. Vrednosti regresionih koeficijenata iz izraza (19)

c_1	c_2	c_{p1}	c_{p2}
-0,1	15,2	1,1	0,5



Slika 35. Zavisnost kontaktne dužine l_{KONT} [mm] od vertikalnog opterećenja G_T [daN] za različite vrednosti pritiska i aproksimacione krive prema izrazu (19)

6.6.3 LINEARIZOVANA KRUTOST

Proračun krutosti vršen je pomoću softvera za tabelarne kalkulacije. Proračun je dat na CD-ROM-u koji predstavlja prilog ovom radu. Podaci za izračunavanje linearizovane krutosti dobijeni su sprovođenjem ispitivanja na dva načina, i to:

- statički, i
- dinamički.

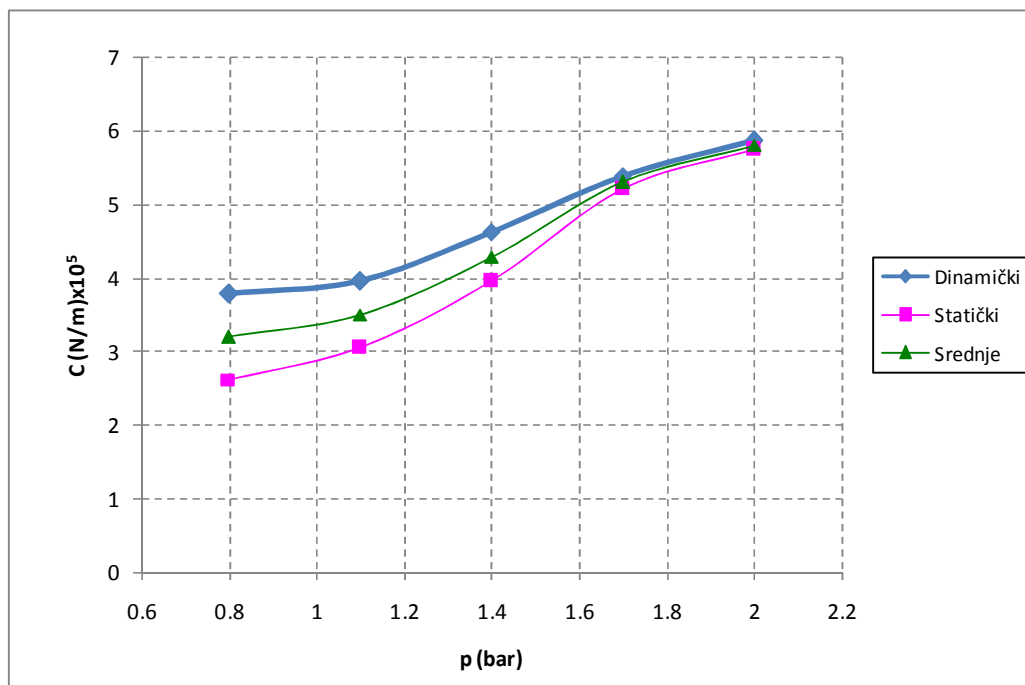
U slučaju statičkog načina, koeficijent krutosti je izračunat na osnovu nagiba linija koje opisuju zakonitost promene defleksije u zavisnosti od vertikalnog opterećenja u statičkim uslovima (slika 32). Pri ovom su u obzir uzeti samo delovi krivih za koje je posmatrana zavisnost približno linearna. Za određivanje vrednosti koeficijenta krutosti korišćen je standardni postupak linearne regresije, na osnovu relacije (10).

Kod dinamičkog načina, vršena su ispitivanja prigušenih oscilacija za različite vrednosti vertikalnog opterećenja pneumatika tj. mase oscilatornog sistema i pritiska u pneumatiku, prema tabeli 3. Na osnovu dobijenih oscilograma, koeficijent krutosti izračunat je na osnovu relacija (11) i (12). Primer izgleda jednog takvog oscilograma prikazan je na slici 37. Oscilogrami su snimljeni za različite kombinacije vertikalnog opterećenja i pritiska, sa po tri ponavljanja što se može smatrati dovoljnim u kontekstu ponovljivosti dobijenih rezultata. S obzirom na rasipanja rezultata, krutost je za svaki oscilogram izračunavana za nekoliko parova susednih vrednosti maksimuma odnosno minimuma položaja, pa je na kraju računata aritmetička sredina dobijenih vrednosti.

Sveukupni rezultati izračunavanja krutosti prikazani su u tabeli 3. Srednja vrednost dinamičke krutosti dobijena je kao aritmetička sredina vrednosti u tri različita merenja, dok ukupna srednja vrednost predstavlja aritmetičku sredinu statičke i srednje dinamičke vrednosti. Izračunate vrednosti su u skladu sa uobičajenim vrednostima za slične pneumatike iz dostupnih literaturnih izvora (npr. [95]). Na dijagramu na slici 36 prikazan je trend promene krutosti sa pritiskom, na osnovu rezultata iz tabele 3.

Tabela 3. Izračunate vrednosti linearizovanog koeficijenta krutosti c [N/m]
Vrednosti vertikalnog opterećenja G_T :
 $G_{T1} = 660 \text{ daN}$; $G_{T2} = 960 \text{ daN}$; $G_{T3} = 1440 \text{ daN}$

Pritisak	0.8 bar	1.1 bar	1.4 bar	1.7 bar	2.0 bar
Krutost (N/m):					
Statička	261088	304957	364064	520127	573638
Dinamička za G_{T1}	339179	355177	403552	462609	486440
Dinamička za G_{T2}	377238	398017	512038	619373	683740
Dinamička za G_{T3}	415736	431002	470158	531498	587033
Srednja dinamička	377384	394732	461916	537827	585737
Srednja ukupna	319236	349844	427990	528977	579687



Slika 36. Trend promene krutosti sa pritiskom za rezultate statičkih i dinamičkih ispitivanja i osrednjena vrednost

Među rezultatima je uočljivo značajno rasipanje. S jedne strane, rasipanje postoji među vrednostima dobijenim pri dinamičkom merenju. S obzirom na to da točak pri ispitivanju miruje (u smislu da se ne kotrlja), fluktuacije radijalne krutosti po obimu ne mogu biti izvor ovih rasipanja, kao ni eventualna geometrijska odstupanja. Jedan od mogućih uzroka promenljivog ponašanja pneumatika u posmatranim uslovima može biti uticaj stohastičke orijentacije tj. konfiguracije molekula elastomera i reoloških osobina gume. Ovakvoj pretpostavci u prilog ide činjenica da rebra pneumatika, sačinjena u potpunosti od elastomera, zbog svojih dimenzija u značajnoj meri učestvuju u mehanizmima koji određuju statička i dinamička svojstva pneumatika. Dalje, određivanje dinamičke krutosti vršeno je pri tri različite mase sistema što je uslovalo i razlike u amplitudama. Razlike u dobijenim vrednostima za krutost stoga mogu biti i posledica nelinearnosti. Jednoznačni trend promene krutosti sa promenom mase sistema, međutim, nije utvrđen.

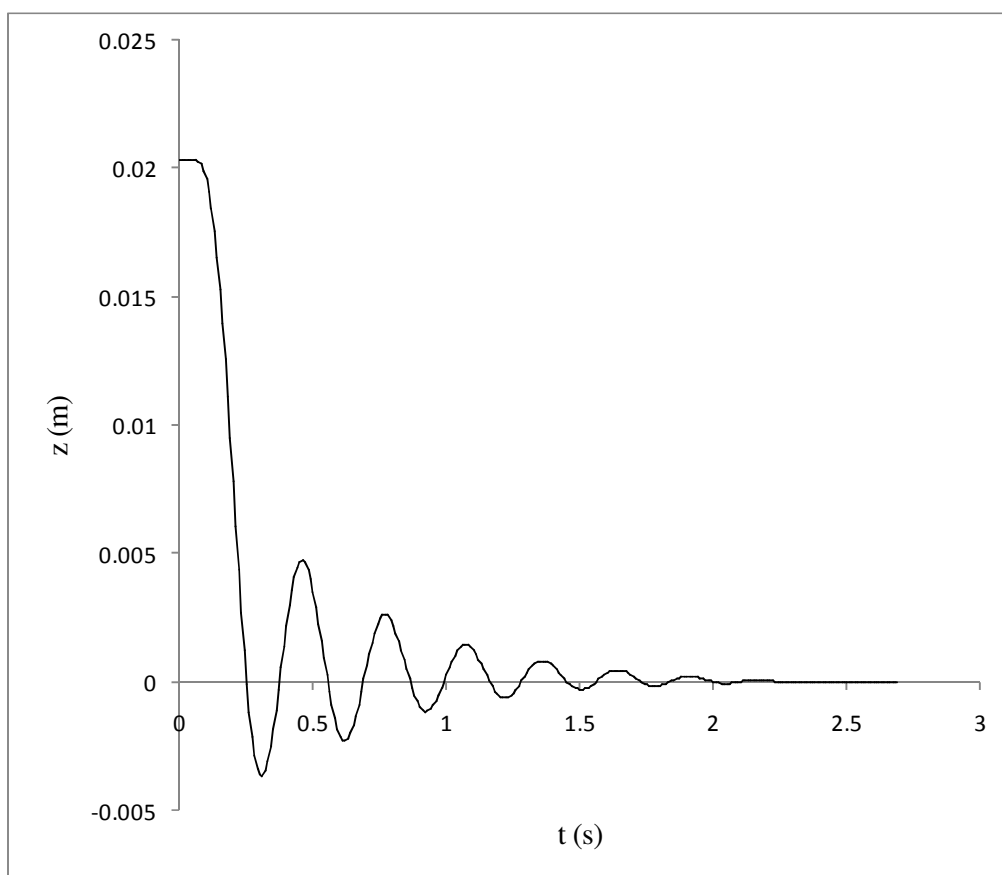
Pored međusobnih razlika rezultata dinamičkih ispitivanja, još je uočljivija razlika između rezultata statičkog i dinamičkog pristupa. Dinamičke vrednosti krutosti su po pravilu veće od statičkih, što navodi na zaključak o mogućem uticaju frekvencije na krutost. Dobijeni rezultati merenja, međutim, ne omogućavaju da se odredi jednoznačni trend uticaja frekvencije na krutost. Takođe, prema literaturnim izvorima (npr. [29], [56]) ne bi trebalo očekivati značajno ispoljavanje uticaja frekvencije na krutost u dijapazonu promene vrednosti sopstvene frekvencije sistema pri datim promenama mase. Tendencija smanjivanja razlike između krutosti dobijene statičkim i dinamičkim merenjima uočljiva je sa porastom pritiska (slika 36) koja za posledicu ima smanjivanje amplitude, što ide u prilog prethodno iznetoj pretpostavci o uticaju nelinearnosti na rezultate.

Na dijagramu koji prikazuje trend promene krutosti sa pritiskom (slika 36) uočava se da pri nižim vrednostima pritiska krutost relativno sporo raste sa pritiskom. Mogući uzrok je povećani uticaj strukture boka pneumatika na ukupnu krutost u odnosu na pneumatski udeo što je karakteristično za niže pritiske. Ovaj odnos vlada sve dok pritisak ne dostigne neku određenu vrednost pri kojoj udeo pneumatske krutosti dostiže odnosno prevazilazi strukturnu krutost. Pri daljem povišenju pritiska, porast krutosti sa pritiskom je sve intenzivniji, jer se povećava uticaj pneumatskog udela krutosti u odnosu na strukturni. Na kraju, za još više vrednosti pritiska, krutost ponovo sporije raste sa pritiskom. Ovo može biti uzrokovano porastom pneumatske krutosti do nivoa kada ona prevazilazi krutost rebara, pa se sistem ponaša kao da su bokovi kruti i osciluju na elastičnim osloncima koje u tom slučaju predstavljaju rebra. Različiti uticaji strukturne i pneumatske krutosti mogu se posmatrati po analogiji sa ekvivalentnom krutošću dve serijski vezane opruge različitih krutosti. Sa povećanjem razlike njihovih krutosti, ekvivalentna krutost sistema postaje bliska onoj sa nižom vrednošću.

6.6.4 LINEARIZOVANO PRIGUŠENJE

Proračun prigušenja vršen je pomoću softvera za tabelarne kalkulacije. Proračun je dat na CD-ROM-u koji predstavlja prilog ovom radu. Rezultati određivanja linearizovanog koeficijenta prigušenja metodom logaritamskog dekrementa prema relacijama (13) i (14) prikazani su u tabeli 4. Na slici 37 prikazan je primer izgleda oscilograma kakvi su korišćeni za određivanje prigušenja i dinamičke krutosti kako je objašnjeno u tačkama 6.5 odnosno 6.4. Kako je već navedeno, oscilogrami su snimljeni za različite kombinacije vertikalnog opterećenja i pritiska, sa po tri ponavljanja što se može smatrati dovoljnim u kontekstu ponovljivosti dobijenih rezultata. Kao i u slučaju krutosti, zbog prisutnog

rasipanja rezultata merenja i kod prigušenja je bilo potrebno sprovesti izračunavanja za nekoliko parova susednih vrednosti maksimuma odnosno minimuma položaja i određivanje aritmetičke sredine. Ukupna srednja vrednost određena je kao aritmetička sredina vrednosti dobijenih merenjima pri različitim masama sistema. Mase sistema odnosno nivoi statičkog vertikalnog opterećenja točka isti su kao pri dinamičkom ispitivanju krutosti (tabela 3) pošto se radi o istim ispitivanjima. I u ovom slučaju se osnovni izvor rasipanja najverovatnije može pripisati stohastičkom karakteru unutrašnjeg trenja unutar elastomerne i kompozitne strukture pneumatika. Dodatni izvor rasipanja bi eventualno moglo da bude trenje u vertikalnim vođicama nosećeg rama u koji je uležišten ispitni točak. Pojava trenja iz ovog izvora je, međutim, u posmatranim uslovima svedena na najmanju moguću meru. Ovo je pre svega uslovljeno konstruktivnim rešenjem vođica realizovanih putem kotrljajnih elemenata od čelika. Takođe, normalna sila u vertikalnim vođicama je u ovim uslovima minimalna, pošto nema uzdužne reakcije na točku.



Slika 37. Primer izgleda oscilograma za određivanje prigušenja i dinamičke krutosti:
 z – vertikalno pomeranje točka, t – vreme (vertikalno opterećenje $G_T = 960$ daN,
 pritisak $p = 1,1$ bar)

U okviru tabelarnih proračuna proveren je i proizvod koeficijenta prigušenja i kružne frekvencije oscilovanja koji bi, prema modelima koji odgovaraju prigušnom ponašanju gume, trebalo da bude približno konstantan [56]. Zbog malog broja mernih vrednosti i

relativno uskog opsega frekvencija, međutim, takav trend nije bilo moguće niti potvrditi niti opovrgnuti.

Tabela 4. Izračunate vrednosti linearizovanog koeficijenta prigušenja [Ns/m] (vrednosti za G_{T1} , G_{T2} i G_{T3} iste su kao u tabeli 3)

Pritisak	0.8 bar	1.1 bar	1.4 bar	1.7 bar	2.0 bar
Koeficijent prigušenja (Ns/m)					
Za G_{T1}	3279.4	2800.3	2703.6	2619.8	2474.7
Za G_{T2}	4281.8	3731.7	3647.8	3467.5	3487.75
Za G_{T3}	7304.7	4943.1	4413.3	4079.7	4150.6
Srednje	4955.3	3825.0	3588.2	3389.0	3371.0

Izračunate srednje vrednosti koeficijenta prigušenja jednoznačno opadaju sa porastom pritiska. Uzrok tome je porast udela pneumatske elastičnosti u odnosu na strukturnu, koja kod pneumatika predstavlja dominantan izvor prigušenja. Izračunate vrednosti su u skladu sa uobičajenim vrednostima za slične pneumatike iz dostupnih literaturnih izvora (npr. [95]).

7. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA KVAZISTATIČKE ENVELOPE KRETANJA TRAKTORSKOG PNEUMATIKA

7.1 Uvodna razmatranja

Da bi se u nastavku rada formulisali odgovarajući zahtevi za model koji treba da bude razvijen, kao i osnovne smernice za uspostavljanje strukture modela, potrebno je bilo sprovesti eksperimentalna istraživanja u čijem se fokusu nalazi sama kvazistatička envelope kretanja, njena svojstva i uticajni faktori. U tački 3.4 razmatrane su opšte karakteristike kvazistatičke envelope kao rezultat istraživanja drugih autora, npr [74], [98] i dr. Ova razmatranja korišćena su kao smernice za utvrđivanje ključnih osobina kvazistatičke envelope u smislu karakteristika njene geometrijske forme i uticajnih faktora koji određuju ove karakteristike i način na koji one učestvuju u determinisanju oscilatorne pobude vozila. Pre početka eksperimentalnih ispitivanja opisanih u ovom poglavlju vršena su preliminarna ispitivanja u funkciji sagledavanja kapaciteta eksperimentalnog postrojenja i dobijanja opštih informacija o karakteru ponašanja pneumatika u posmatranom kontekstu [86] [87] [89].

Na početku poglavlja opisan je sam postupak snimanja kvazistatičke envelope u smislu prikupljanja i dalje obrade mernih podataka. Nakon toga, u funkciji izučavanja envelope kretanja u gore navedenom smislu kao uvodne etape ovog dela rada sprovedeni su sledeći postupci:

- eksperimentalno istraživanje uticaja eksploatacionih parametara pneumatika (vertikalno opterećenje i pritisak, odnosno posledična dužina kontaktne površine) na formu kvazistatičke envelope kretanja;
- ispitivanje osetljivosti promene kvazistatičke envelope kretanja pneumatika na promenu dužine kontaktne površine; ovo je smatrano neophodnim da bi se, zajedno sa rezultatima prethodne dve etape istraživanja, uvidelo da li je neophodno strukturom modela obuhvatiti dužinu kontaktne površine odnosno njene fluktuacije tokom kretanja;

U okviru obe navedene faze istraživanja izvršeno je utvrđivanje merodavnih vrednosti eksploatacionih parametara – vertikalnog opterećenja i pritiska na osnovu odgovarajućih kriterijuma.

Nakon ovih istraživanja, sprovedena je računaska procena fluktuacija vertikalnog opterećenja pneumatika tokom eksploatacije, sa ciljem da se proceni red veličine fluktuacija dužine kontaktne površine pneumatika u toku kretanja odnosno njihov uticaj na promenu forme kvazistatičke envelope za vreme kotrljanja pneumatika u dinamičkim uslovima.

Nakon prethodnih etapa koje se mogu smatrati preliminarnim istraživanjima glavnih osobina kvazistatičke envelope i ponašanja pneumatika sa tog aspekta, sprovedena su merenja u funkciji prikupljanja empirijskih podataka za razvoj modela.

U eksperimentalnim ispitivanjima je korišćen samo jedan pneumatik, što je u najvećoj meri uslovljeno tehničkim i ekonomskim ograničenjima. Ova okolnost se, uslovno, može posmatrati kao nedostatak. Treba, međutim, imati u vidu da su aspekti ponašanja pneumatika koji se izučavaju u ovom radu uslovljeni pre svega dimanzijama, geometrijom i unutrašnjom strukturom pneumatika. Ovi pokazatelji su u velikoj meri slični za čitavu familiju pogonskih pneumatika poljoprivrednih traktora, te se forme ponašanja koje iskazuje posmatrani pneumatik u kvalitativnom smislu mogu smatrati tipičnim. Drugim rečima, polazi se od pretpostavke da pneumatik ispoljava tipično ponašanje kakvo se može očekivati i kod pneumatika različitog tipa i dimenzija. Dalje, istraživanje je fokusirano na razvoj modela koji će služiti za opisivanje određene karakteristike familije pneumatika, a ne za upoređivanje većeg broja svojstava koja se mogu razlikovati među različitim pneumaticima. Navedene okolnosti opravdavaju sprovođenje istraživanja sa samo jednim primerkom pneumatika.

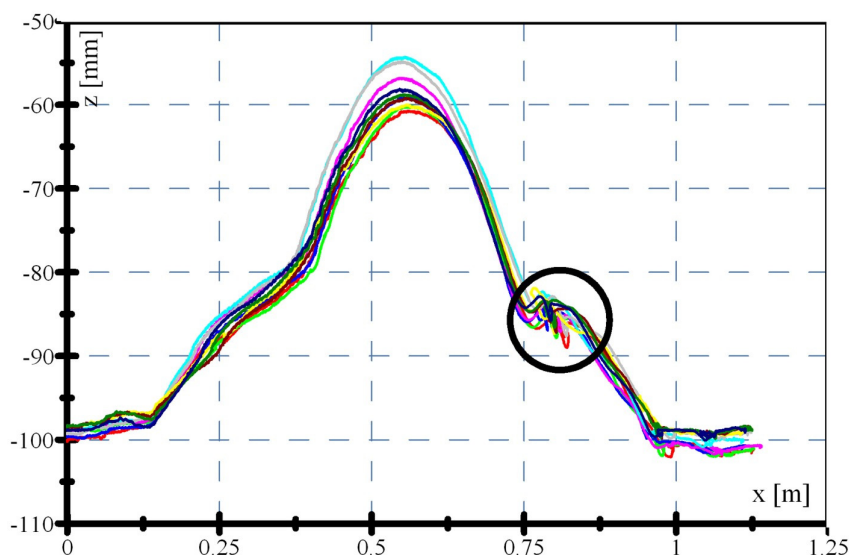
7.2 Postupak snimanja kvazistatičke envelope i obrade mernih podataka

Sprovođenje merenja počinje sa fiksiranjem uslova:

- postavlja se prepreka željene geometrije;
- podešavaju se vrednosti pritiska i vertikalnog opterećenja, odnosno dužine kontaktne površine;
- položaj mernih kolica se postavi tako da se pneumatik nalazi u položaju bliskom ostvarivanju kontakta sa preprekom;
- označava se startna pozicija pneumatika odnosno mernih kolica zbog ponovljivosti.

Potom se točku saopštava hod preko prepreke sve do prekida kontakta na silaznoj strani. Neophodno je, koliko god je to ostvarljivo, ukloniti dinamičke uticaje. Stoga je potrebno obezbediti da točak prelazi preko prepreke što je moguće manjom brzinom. U rezultatima merenja javlja se rasipanje koje je posledica neuniformnosti pneumatika (odstupanja geometrije i fluktuacija radijalne krutosti) i uticaja položaja rebara koji je uslovljen stohastičkom ugaonom orijentacijom oboda pneumatika pri početku merenja. Konstatovano je da se čak i pri kotrljanju točka praktično bez dejstva uzdužne sile pojavljuje uzdužno klizanje izraženo u meri koja je dovoljna da pri svakom povratku točka na početnu poziciju ugaona orijentacija gazećeg sloja (u odnosu na y-osu) bude drugačija. Takođe je opravdano pretpostaviti da rasipanja u određenoj meri potiču i od viskoelastičnog ponašanja elastomera koje je delimično stohastičke prirode, a što je kod traktorskog pneumatika zbog nižih pritisaka, masivnije strukture i pre svega zbog izraženog orebrenja gazećeg sloja svakako znatno izraženije nego kod pneumatika drumskih vozila. Radi kompenzacije rasipanja svako merenje za konstantan pritisak, opterećenje i geometriju prepreke sprovedeno je 5 ili 10 puta.

Kako je istaknuto prilikom opisa svojstava mernog postrojenja, problem sa zatezanjem pogonskog lanca pri dolasku točka na silazni deo prepreke nije rešen na zadovoljavajući način. Usled postojanje zazora i elastičnosti mehaničkih komponenata u tom području dolazi do kratkotrajnog narušavanja krute kinematičke veze između pogonskog sistema i točka usled dejstva gravitacione sile. Tom prilikom dolazi do naglog porasta brzine kretanja a odmah potom posledično i do ponovnog zatezanja lanca i smanjenja brzine pneumatika udarnog karaktera, što dovodi do uzdužnih i vertikalnih oscilacija a to je upravo režim koji se pri ovoj vrsti ispitivanja želi izbeći. Primer izgleda snimljene familije kvazistatičkih envelopea u jednom od slučajeva zadatih uslova na kom je uočljiv pomenuti efekat prikazan je na dijagramu na slici 38. Segment krive na kome se vidi ispoljavanje posmatranog problema istaknut je podebljanim kružnom linijom.



Slika 38. *Kvazistatička envelope kretanja za vertikalno opterećenje $G_T = 960 \text{ daN}$, pritisak 1,1 bar i prepreku poprečnog preseka $200 \times 50 \text{ mm}$*

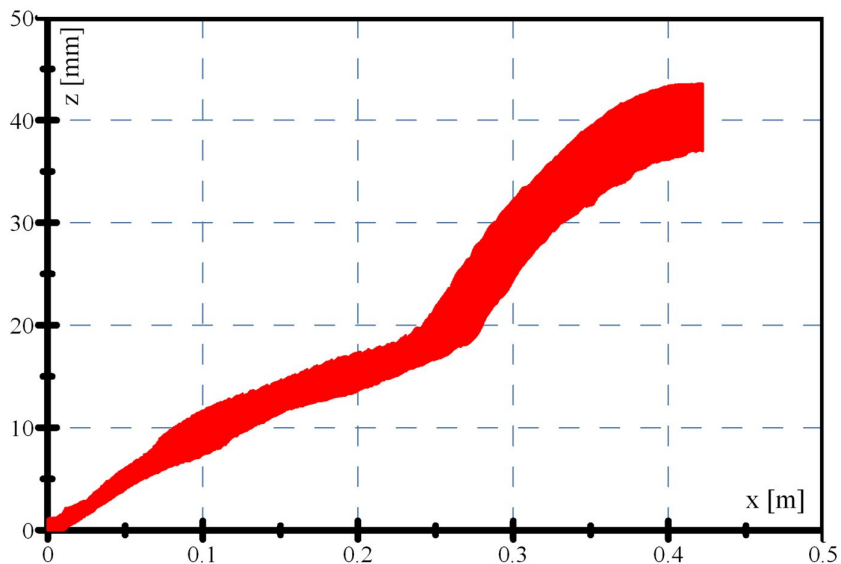
Vizuelnom analizom krive na slici 38 može se izvesti pretpostavka da su nailazni i silazni deo kvazistatičke envelope, ukoliko bi se eliminisali dinamički i stohastički uticaji, simetrični. Do istog zaključka dolazi se i za ostale rezultate merenja, a ovakav stav potvrđen je i od strane drugih autora koji su sprovodili slične eksperimente, npr. [98]. Stoga je odlučeno da se u funkciji pojednostavljenja daljeg rada posmatra samo nailazni segment krive, a da se za situaciju kada se pneumatik nalazi na silaznom delu sa aspekta fenomena kvazistatičke prirode usvoji simetričan odziv. Time se istovremeno eliminiše opisani problem neželjenog dinamičkog uticaja na silaznom delu krive.

Pored usvojenog koncepta simetrije, obrada mernih podataka je obuhvatila još i:

- uklanjanje podataka koji potiču od položaja pneumatika pre kontakta sa preprekom, tj. fokusiranje samo na onaj deo krive koji se odnosi na posmatrani odziv;

- anuliranje referentnog visinskog nivoa kako bi se eliminisao uticaj defleksije elastične strukture i dobile međusobno uporedive forme kvazistatičke envelope;
- sortiranje svih podataka u jedan kanal radi pojednostavljenog osrednjavanja i filtriranja podataka.

Izgled krive sa slike 38 nakon sprovođenja svih navedenih operacija prikazan je na slici 39.



Slika 39. Konačni izgled kvazistatičke envelope prikazane na sl. 38 nakon transformacije izvornih mernih podataka

Uprkos značajnom rasipanju rezultata merenja, dodatni postupci obrade podataka kao što su osrednjavanje, regresiona analiza, filtriranje i sl. nisu vršeni. Za ovo u datom kontekstu nije bilo potrebe s obzirom na to da se model zasnovan na neuronskoj mreži tokom obuke sam prilagođava na šum u ulaznim podacima.

7.3 Istraživanje uticaja eksploatacionih parametara pneumatika na kvazistatičku envelopu kretanja

Karakteristike geometrijskog filtriranja neravnina podloge, odnosno geometrijski parametri mikroprofila, za dati profil menjaju se sa promenom defleksije pneumatika i dužine kontaktne površine (između ove dve veličine postoji jednoznačna veza – slika 33). Promene ovih veličina uslovljavaju i promenu forme lokalnih deformacija u zoni kontakta pneumatika sa kratkotalasnim neravninama, a utiču i na geometrijsko mesto početka odnosno završetka odziva u prostornom domenu za određenu singularnu neravninu. Eksploatacioni parametri koji utiču na dužinu kontaktne površine odnosno defleksiju, a time i na formu kvazistatičke envelope, su:

- vertikalno opterećenje pneumatika, i
- pritisak u pneumatiku.

Ovi parametri, prema tome, imaju ključni uticaj na efektivni mikroprofil. Pri tome, međutim, određena dužina kontaktne površine može biti realizovana za različite kombinacije vertikalnog opterećenja i pritiska. S obzirom na promenu filtrirajućih svojstava pneumatika do koje dolazi sa promenom kontaktne dužine, od interesa je da se istraži da li se može smatrati da geometrija kvazistatičke envelope zavisi samo od dužine kontaktne površine, bez obzira na vrednosti pritiska i vertikalnog opterećenja. Potvrđivanje ovakve pretpostavke u funkciji je pojednostavljenja daljih eksperimentalnih ispitivanja.

U tu svrhu, odabrano je nekoliko diskretnih vrednosti kontaktne površine sa kojima je vršena provera. Pošlo se od toga da postrojenje, kako je prikazano u tački 5.1, pruža mogućnost za rad sa tri nivoa vertikalnog opterećenja:

- minimalno od 660 daN,
- srednje od 960 daN, i
- maksimalno od 1440 daN.

S obzirom na karakteristike postrojenja, pri varijacijama vertikalnog opterećenja korišćene su navedene tri vrednosti. Za centralnu tačku odabrano je opterećenje od 960 daN kao srednje od tri moguća nivoa, pri pritisku od 1,1 bar. Ovaj radni režim izabran je kao nominalni u okviru ovog dela istraživanja na osnovu sledećih razloga:

- 1) opterećenje vertikalnom silom od 960 daN može se smatrati najpribližnijim uobičajenim statičkim eksploatacionim opterećenjima pneumatika ovih dimenzija¹¹;
- 2) prema katalogu pneumatika [102], nosivost datog pneumatika pri pritisku od 1,2 bar iznosi 1050 daN, što je minimalna navedena vrednost; na osnovu toga procenjeno je da opterećenju od 960 daN odgovara vrednost nazivnog pritiska od 1,1 bar; za ovaj radni režim je, između ostalih, vršeno ispitivanje osnovnih

¹¹ Detaljnije obrazloženje iznetog stava dato je u nastavku rada.

karakteristika pneumatika (poglavlje 6) pa je unapred poznat podatak o izmerenoj vrednosti kontaktne dužine.

Pri pritisku od 1.1 bar i statičkom opterećenju od 960 daN izmerena je dužina kontaktne površine od 344 mm. Na osnovu tog podatka, zaokruživanjem ove vrednosti kao merodavna usvojena je vrednost:

- $l_{\text{KONT}} = 35 \text{ cm}$ – nazivna vrednost dužine kontaktne površine

Za razliku od postupka ispitivanja zavisnosti defleksije i kontaktne dužine opisanog u tački 6.3, gde je postupak merenja uslovio konstantni položaj pneumatika, u ovom slučaju merenje vrednosti kontaktne dužine vršeno je pri varijacijama njegovog ugaonog (a samim tim i uzdužnog) položaja. Za razliku od pretpostavke iznete u tački 6.3 zasnovane na rezultatima objavljenim u radu [27], gde je utvrđeno da slučajne varijacije položaja gazećeg sloja imaju marginalan uticaj na dužinu kontaktne površine, ovom prilikom je utvrđeno da pri merenju dužine kontaktne površine pri nepromenljivim uslovima u pogledu pritiska i opterećenja dolazi do značajnih rasipanja uslovljenih konstruktivnim karakteristikama poljoprivrednih pneumatika.

Izbor ostalih vrednosti kontaktne dužine pri kojima su vršena merenja u ovom delu ispitivanja izvršen je uzimajući u obzir izmerene vrednosti kontaktne dužine pri različitim vrednostima vertikalnog opterećenja i pritiska (tačka 6.6.2, slika 35). Rezultati merenja su pokazali da dijapazonu vertikalnih defleksija $f \approx 10\div 70 \text{ mm}$ odgovara dijapazon kontaktnih dužina $l_{\text{KONT}} \approx 200\div 470 \text{ mm}$. Na osnovu ovih vrednosti odlučeno je da se nazivna vrednost kontaktne dužine pri ispitivanjima varira za $\pm 5 \text{ cm}$, odnosno da se za ispitivanje koriste još kontaktne dužine od 30 i 40 cm. Na ovaj način dobile bi se tri vrednosti kontaktne dužine pri tri vrednosti vertikalnog opterećenja, što bi predstavljalo ukupno 9 eksploatacionih režima za proveru pretpostavke o mogućnosti redukcije potrebnih podataka tako što bi se umesto podataka o vrednostima opterećenja i pritiska koristila samo vrednost kontaktne dužine. Međutim, ustanovljeno je da pri vertikalnom opterećenju od 660 daN nije mogla biti postignuta vrednost kontaktne dužine veća od 35 cm, osim eventualno pri korišćenju veoma niskih vrednosti pritiska. Pri tome, međutim, ponašanje pneumatika ne bi moglo biti smatrano merodavnim. U uslovima isuviše niskih pritisaka, naime, mehanička svojstva pneumatika potiču pretežno od strukturne krutosti dok se pneumatska krutost gubi, što predstavlja eksploatacione uslove za kakve pneumatik nije predviđen. Takođe, pri vertikalnom opterećenju od 1440 daN nije bilo moguće postići dužinu manju od 35 cm. Ovo je posledica uslovljenosti kontaktne dužine elastičnom deformacijom gazećeg sloja odnosno samih rebara pri proizvoljnom porastu pritiska iznad određene vrednosti. Drugim rečima, kada pritisak prevaziđe određeni nivo, krutost bokova pneumatika postaje tolika velika da dužinu naleganja pneumatika na podlogu određuje samo deformacija rebara na koju, međutim, pritisak nema uticaj, pa nije moguće njeno dalje podešavanje. Zbog ovih ograničenja, a da bi se dobio dovoljan broj podataka i omogućila uporedivost, vrednostima kontaktne dužine dodate su i vrednost od 30 cm pri 660 i 960 daN odnosno 45 cm pri 960 i 1440 daN. Konačno usvojeni eksploatacioni režimi za vršenje ovog dela istraživanja, u smislu vertikalnog opterećenja i kontaktne dužine, prikazani su u okviru tabele 5 u kojoj je dat i prikaz rezultata ispitivanja.

Odgovarajuće vrednosti pritiska za koje se pri datim nivoima vertikalnog opterećenja dobijaju usvojene vrednosti kontaktne dužine određene su eksperimentalno polazeći od rezultata ispitivanja zavisnosti između kontaktne dužine i defleksije – odnosno vertikalnog opterećenja – pri različitim pritiscima (poglavlje 6.6.2). Na osnovu ovih podataka približno je procenjena vrednost pritiska koja pri datom vertikalnom opterećenju rezultira traženom

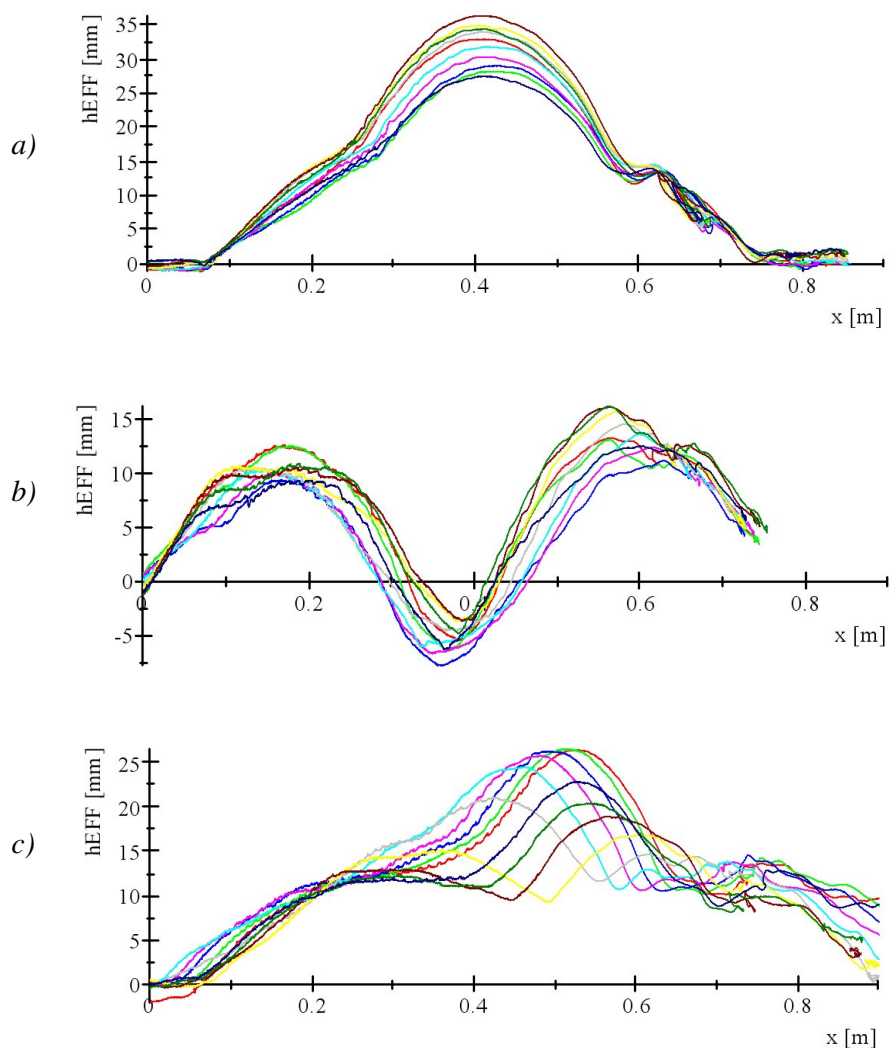
kontaktnom dužinom. Potom je nakon orijentacionog podešavanja pritiska merena stvarna kontaktna dužina i na osnovu rezultata vršena odgovarajuća korekcija pritiska naviše ili naniže. Merenje kontaktne dužine vršeno je postupkom opisanim u poglavlju 6.3 za više položaja točka u odnosu na ispitnu stazu. Kotrljanjem točka eliminisan je uticaj relaksacije gume i trenja u kontaktnoj površini na kontaktnu dužinu pri promeni pritiska u mirovanju točka. Postupak je iterativno ponavljan do dostizanja željene kontaktne dužine, pri čemu je beležena vrednost pritiska. Vidno rasipanje rezultata, koje je bilo prisutno pri kontrolnim merenjima kontaktne dužine za različite položaje pneumatika na ispitnoj stazi, može se najverovatnije pripisati geometrijskim odstupanjima, fluktuacijama mehaničkih svojstava po obimu pneumatika, slučajnom uticaju položaja rebara u odnosu na podlogu tj. na oblik njihovog otiska, i viskoelastičnom karakteru elastomera, pre svega osobinama puzanja i prisutnim fluktuacijama mehaničkih osobina uslovljenih prostornom konfiguracijom molekularne strukture.

Kao ispitni profil podloge odabran je drveni blok pravougaonog poprečnog preseka dimenzija 90×50 mm. Prepreka je korišćena u dve prostorne orijentacije (slika 40), tako da je u jednom slučaju bila postavljena poprečno na pravac kretanja, a u drugom pod uglom od 50° u odnosu na poprečnu osu.



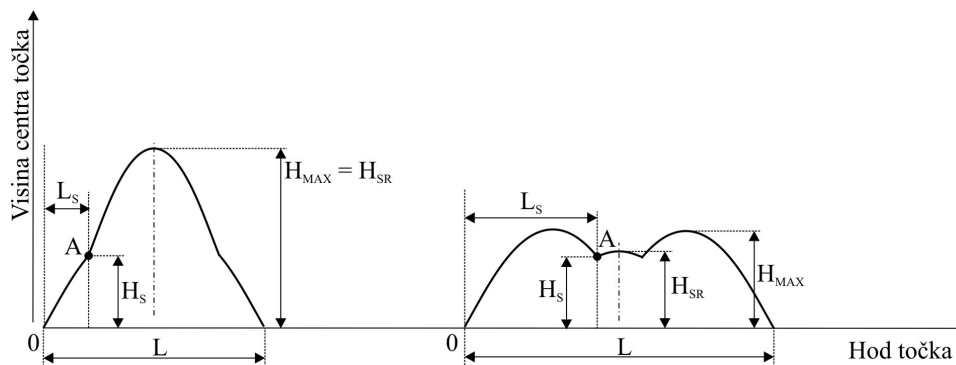
Slika 40. Ispitni profil podloge u dve prostorne orijentacije

U okviru ispitivanja ukupno je izvršeno 18 merenja (tabela 5). Tri tipična rezultata prikazana su na slici 41.



Slika 41. Primeri forme efektivnog mikroprofila dobijenih ispitivanjem: a) za vertikalno opterećenje $G_T = 960$ daN i kontaktnu dužinu $l_{KONT} = 30$ cm za poprečnu prepreku, b) za $G_T = 1440$ daN, $l_{KONT} = 45$ cm za poprečnu prepreku, i c) za $G_T = 1440$ daN, $l_{KONT} = 40$ cm za kosu prepreku

Rezultati ispitivanja u smislu vrednosti geometrijskih parametara efektivnog mikroprofila za odgovarajuće vrednosti kontaktne dužine i variranih eksploatacionih parametara prikazani su sumarno u tabeli 5. Rezultati su određeni vizuelnim očitavanjem i procenom približne srednje vrednosti parametara. U pojedinim slučajevima rasipanja su bila izražena u meri za koju više nije smatrano svrsishodnim određivati srednju vrednost. U tim slučajevima u tabeli 5 je umesto vrednosti stavljena oznaka "*". Značenje geometrijskih parametara navedenih u tabeli 5, izvorno uvedenih u okviru tačke 3.4.3 (slika 10), na ovom mestu je ponovo, radi preglednosti, objašnjeno na slici 42.



Slika 42. Oznake geometrijskih parametara navedenih u tabeli 5 za dva karakteristična slučaja kvazistatičke envelope

Osnovna karakteristika rezultata merenja jeste izraženo rasipanje, pogotovo u slučaju koso postavljene prepreke. Ovo otežava interpretaciju i donošenje jednoznačnih zaključaka. Može se, međutim, uočiti da su dobijeni rezultati po redu veličine bliski i uglavnom pokazuju slične trendove promene. Takođe, vizuelnim upoređivanjem dobijenih formi kvazistatičke envelope (grafički prikaz svih rezultata je zbog obima izostavljen, primeri su prikazani na sl. 41) dolazi se do zaključka da postoji opravdanje da se kontaktna dužina koristi kao jedinstveni eksploatacioni parametar kvazistatičke envelope, zamenjujući podatke o vertikalnom opterećenju i pritisku. Ovakav pristup može da omogući značajna pojednostavljenja u daljem toku rada. Stoga je opravdano prihvatiti eventualni manji gubitak tačnosti do koga može doći njegovim usvajanjem.

U vezi sa rasipanjem rezultata i odstupanjem od usvojene pretpostavke, na ovom mestu će biti komentarisano značajnije odstupanje od generalne tendencije koje je prisutno kod rezultata merenja za vertikalno opterećenje od 960 daN i kontaktnu dužinu od 35 cm. Ovom režimu, naime, odgovara pritisak u pneumatiku od 0,5 bar. Ovo je veoma niska vrednost pritiska, za koju može doći do neproporcionalnog porasta uticaja mehaničkih osobina strukture pneumatika u odnosu na pneumatske. Kako je već objašnjeno, ovo dovodi do toga da njegovo ponašanje, usled isuviše niskog pritiska, više ne reprezentuje merodavan slučaj. Ovo se za vreme ispitivanja na posmatranom režimu moglo uočiti i po veoma izraženim deformacijama bokova pneumatika u kontaktnoj zoni.

Tabela 5. Vrednosti eksploatacionih parametara pri ispitivanju uticaja na kvazistatičku envelope (prepreka 1 – normalna na pravac kretanja, prepreka 2 – pod kosim uglom) i geometrijski parametri (prema sl. 10, tačka 3.4.3) dobijenih kvazistatičkih envelope

Vertikalno opterećenje	Geometr. parametri prema sl. 42	Kontaktna dužina [cm]			
		30	35	40	45
660 daN Prepreka 1	L [mm]	670	718		
	H _{MAX} [mm]	18	12		
	H _{SR} [mm]	18	5		
	L _S [mm]	220	400		
	H _S [mm]	13	*		
960 daN Prepreka 1	L [mm]	670	710	740	795
	H _{MAX} [mm]	30	21	14	15
	H _{SR} [mm]	30	21	-2	-6
	L _S [mm]	180	213	373	385
	H _S [mm]	14	18	-2	-6
1440 daN Prepreka 1	L [mm]		710	735	750
	H _{MAX} [mm]		23	12	10
	H _{SR} [mm]		23	5	-5
	L _S [mm]		226	376	366
	H _S [mm]		15	5	-5
660 daN Prepreka 2	L [mm]	790	850		
	H _{MAX} [mm]	24	22		
	H _{SR} [mm]	24	22		
	L _S [mm]	200	*		
	H _S [mm]	14	14		
960 daN Prepreka 2	L [mm]	795	855	900	910
	H _{MAX} [mm]	30	25	17	13
	H _{SR} [mm]	30	25	17	4
	L _S [mm]	200	*	390	*
	H _S [mm]	15	17	6	*
1440 daN Prepreka 2	L [mm]		920	910	925
	H _{MAX} [mm]		28	20	12
	H _{SR} [mm]		28	20	7
	L _S [mm]		289	*	*
	H _S [mm]		17	*	*

7.4 Ispitivanje osetljivosti promene kvazistatičke envelope kretanja pneumatika na promenu dužine kontaktne površine

Cilj ispitivanja

Kako je pokazano da dužina kontaktne površine može da se posmatra kao ključni faktor kroz koji se ispoljava uticaj eksploatacionih parametara na formu kvazistatičke envelope¹², neophodno je da se izvrši kvantifikacija tog uticaja. Pored ove kvantifikacije, u narednom delu rada sprovedena je i orijentaciona računaska procena očekivanog nivoa fluktuacija dinamičkog opterećenja točka i posledičnih fluktuacija kontaktne dužine. Istovremenim uzimanjem u obzir dobijenih rezultata biće pokazana potreba za uključivanjem tekuće vrednosti kontaktne površine u empirijski model envelope kretanja.

U funkciji kvantifikacije uticaja promene kontaktne dužine na promenu filtrirajućih svojstava pneumatika, odnosno ispoljenu formu envelope kretanja, sprovedena su merenja za određivanje geometrijskih parametara kvazistatičke envelope pri prelasku točka preko određene singularne prepreke pri različitim veličinama kontaktne dužine.

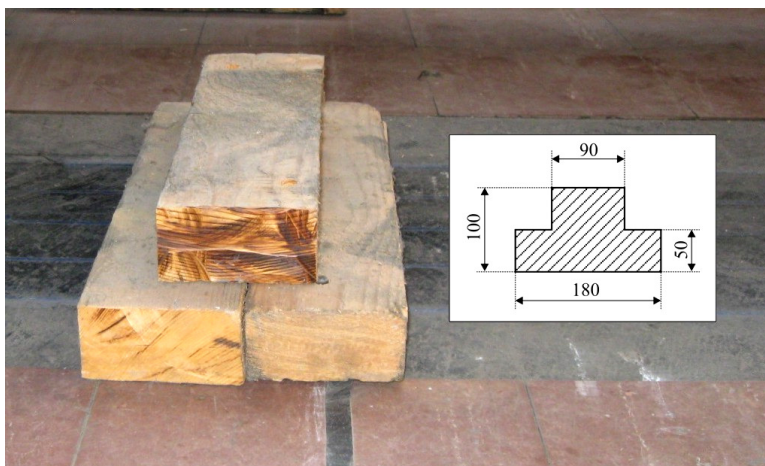
Korišćenje pretpostavke o ekvivalentnosti informacija o vertikalnom opterećenju i pritisku sa jedinstvenim podatkom o kontaktnoj dužini omogućava pojednostavljenje daljih eksperimentalnih ispitivanja s obzirom na to da se može raditi sa konstantnim vertikalnim opterećenjem i varirati samo pritisak u pneumatiku u funkciji obrzbeđenja željenih vrednosti kontaktne dužine. Vrednosti za dužinu kontaktne površine koje se koriste u ovom delu ispitivanja preuzete su iz prethodne tačke i shodno tome iznose:

- $l_{\text{KONT1}} = 30 \text{ cm};$
- $l_{\text{KONT2}} = 35 \text{ cm};$
- $l_{\text{KONT3}} = 40 \text{ cm};$
- $l_{\text{KONT4}} = 45 \text{ cm};$

Za vertikalno opterećenje odabrana je vrednost od 960 daN kao srednja od tri moguće, i, prema proceni, najbliža očekivanim eksploatacionim uslovima za posmatrani pneumatik. Takođe, kako je pokazano u prethodnoj tački, ovo je i jedina od tri moguće konfiguracije ispitnog postrojenja pri kojoj je moguće realizovati sve 4 usvojene vrednosti kontaktne dužine (videti tabelu 5). Zadate vrednosti kontaktne dužine realizovane su iterativnim podešavanjem pritiska postupkom opisanim u tački 7.3.

Oblik profila podloge korišćenog pri ispitivanju prikazan je na slici 43.

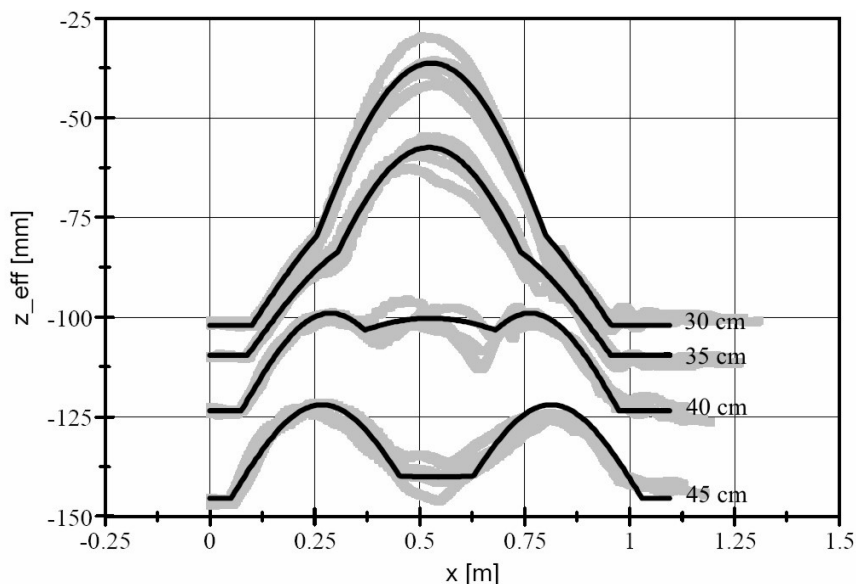
¹² Izneto važi uz ograničenje da pritisak nije toliko nizak da pneumatska krutost gubi na značaju u odnosu na strukturnu. Ovaj slučaj, međutim, javlja se tek pri pritiscima isuviše niskim za normalnu eksploataciju pneumatika.



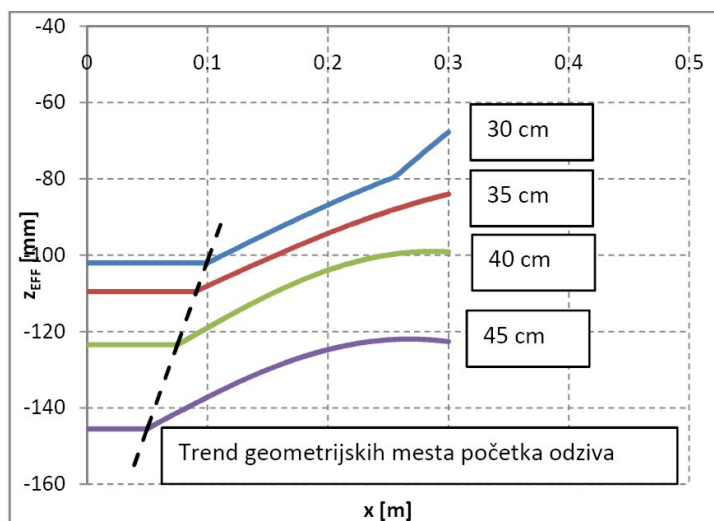
Slika 43. Oblik profila podloge korišćen pri ispitivanju osetljivosti kvazistatičke envelope na promenu kontaktne dužine

Rezultati ispitivanja su prikazani na slici 44. Zbog bolje preglednosti, krive su vertikalno pomerene jedna u odnosu na drugu. Vrednosti efektivne visine mikroprofila predstavljaju izvorne podatke za konstruktivni položaj davača pomeranja u odnosu na postrojenje. Naime, induktivni davač pomeranja poseduje apsolutnu nulu u fiksnom položaju tako da se u opštem slučaju vertikalna koordinata izračunava kao razlika položaja u odnosu na neki odabrani referentni nivo. U ovom slučaju, izvorne vrednosti su iz navedenog razloga zadržane. Promene defleksije pri podešavanju pritiska u funkciji izbora kontaktne dužine dovele su i do promene položaja referentnog nivoa centra točka, što je ovde iskorišćeno da bi se karakteristike dobijenih krivih međusobno vizuelno lakše razlikovale. Sa slike su, osim različite prirode toka ordinate efektivnog mikroprofila u funkciji položaja, jasno uočljive i značajne razlike u amplitudama.

Na slici 45 uvećan je deo slike 44 na kom se vidi trend pomeranja geometrijskog mesta početka odziva ka većim vrednostima uzdužnog položaja točka sa smanjenjem vrednosti kontaktne dužine, do čega dolazi zbog kasnijeg uspostavljanja kontakta između pneumatika i singularne prepreke pri manjim defleksijama koje odgovaraju manjim kontaktnim dužinama. Zbog osne simetričnosti prepreke odnosno samim tim i kvazistatičke envelope, kasniji početak trajanja kontakta u slovljava i njegov raniji završetak, odnosno, kao ukupan efekat, smanjenje dužine trajanja odziva u prostornom domenu. Ako se ovome dodaju i veće amplitude odziva koje odgovaraju manjim vrednostima kontaktne površine, vidi se da su niskopojasna filtrirajuća svojstva pneumatika sa smanjenjem kontaktne dužine sve manjeg intenziteta, odnosno povećavaju se amplitude a snižavaju frekvencije odziva.

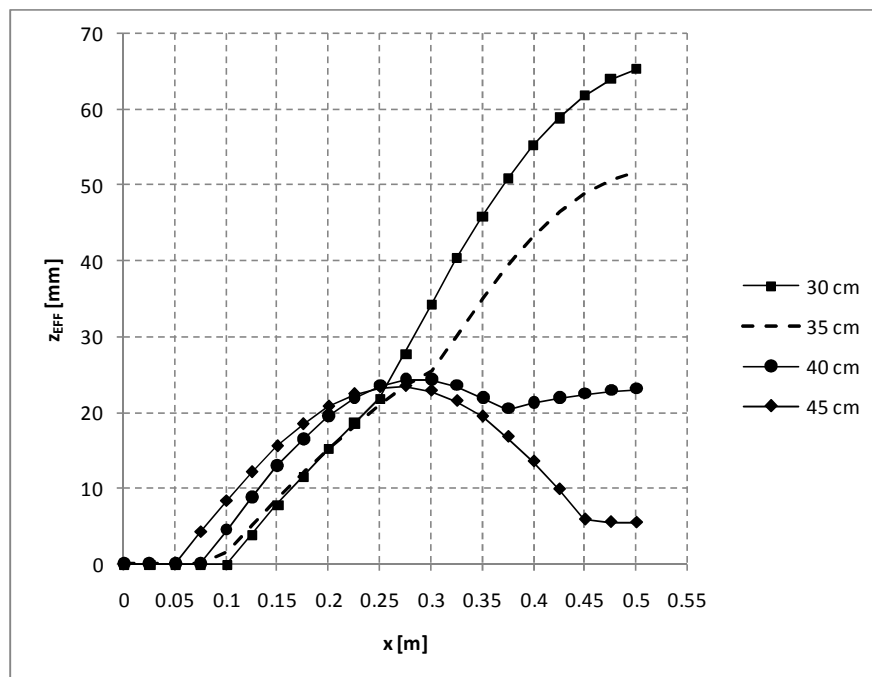


Slika 44. Oblici efektivnog mikropfila za vertikalno opterećenje od 960 daN pri prelasku pneumatika preko profila podloge prikazanog na sl. 43 za kontaktne dužine od 30, 35, 40 i 45 cm



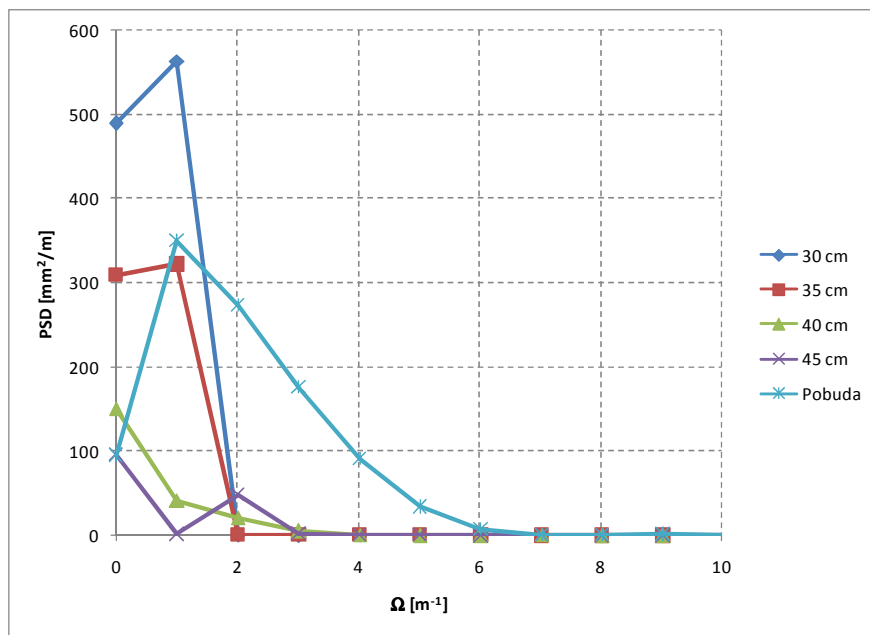
Slika 45. Obeležavanje trenda promene mesta početka kontakta pneumatika sa singularnom preprekom pri promeni kontaktne dužine

Još jedan prikaz poređenja rezultata merenja dat je na slici 46. Na ovom dijagramu sve krive su svedene na zajednički referentni nivo a prikaz je, radi lakšeg poređenja, dat samo do mesta zajedničke vertikalne ose simetrije. Na ovom dijagramu se može uočiti da se i položaj tačke diskontinuiteta (slika 10, tačka 3.4.3) za sve krive razlikuje po obe koordinate, što je još jedan pokazatelj različitog karaktera dobijenih krivih.



Slika 46. Poređenje oblika efektivnog mikroprofila svedenih na isti referentni visinski nivo

U okviru analize rezultata takođe je izvršeno i upoređivanje frekventnog sadržaja krivih u formi spektralne gustine snage, slika 47. Na slici se uočava promena filtrirajućih svojstava sa promenom kontaktne dužine, odnosno promena frekventnog sadržaja odziva u odnosu na pobudu u skladu sa zaključcima donetim poređenjem toka krivih u prostornom domenu. Za sprovedeno ispitivanje uočava se nagla promena u ponašanju pneumatika pri prelasku sa kontaktne dužine od 35 na 40 cm. Promena pri prelasku sa 30 na 35 cm takođe je značajna. Pri prelasku sa 40 na 45 cm promena je nešto manje izražena, što se može pripisati tendenciji da zbog dosta niskog pritiska svojstva pneumatika na ovim režimima potiču pretežno od strukturne krutosti u odnosu na pneumatsku, odnosno promene pritiska sa njegovim opadanjem sve manje utiču na promene u ponašanju pneumatika.



Slika 47. Poređenje funkcija spektralne gustine snage

Rezultati ovog dela ispitivanja pokazuju da varijacije kontaktne dužine u posmatranim granicama značajno utiču na karakter odziva pneumatika sa aspekta generisanja efektivnog mikroprofila. U narednoj tački izvršena je orijentaciona računaska procena očekivanog nivoa fluktuacija kontaktne dužine u uobičajenim uslovima kretanja traktora kako bi se doneo zaključak o očekivanom nivou varijacija filtrirajućih karakteristika pneumatika. Generalni zaključak o sadejstvu dva posmatrana mehanizma relevantan je za izbor strukture empirijskog modela.

7.5 Računska procena fluktuacija vertikalnog opterećenja i dužine kontaktne površine pneumatika pri kretanju traktora na karakterističnim podlogama

Tokom kretanja traktora po neravnoj podlozi, usled oscilatorne pobude dolazi do fluktuacije vertikalnih reakcija između točka i podloge što za posledicu ima odgovarajuće fluktuacije defleksije pneumatika. Zbog geometrijske uslovljenosti između defleksije pneumatika i dužine kontaktne površine, fluktuacija dinamičkih opterećenja dovodi do fluktuacija dužine kontaktne površine. Kako je pokazano u prethodnoj tački, promena defleksije tj. dužine kontaktne površine menja karakter geometrijskog filtriranja kratkotalasnih neravnina podloge odnosno utiče na formu kvazistatičke envelope kretanja pneumatika. Potrebno je oceniti očekivani nivo fluktuacija vertikalnog opterećenja odnosno posledičnih varijacija kontaktne dužine kako bi se, uzimajući u obzir rezultate dobijene u prethodnoj tački, sagledao očekivani nivo uticaja promenljivosti karakteristika envelope pri kretanju traktora i s tim u vezi izvršio adekvatan izbor strukture modela. Za slučaj da su fluktuacije u umerenim granicama, može se očekivati da posledična promena ponašanja pneumatika nije izrazita. U takvom slučaju, ovu promenu ponašanja u toku

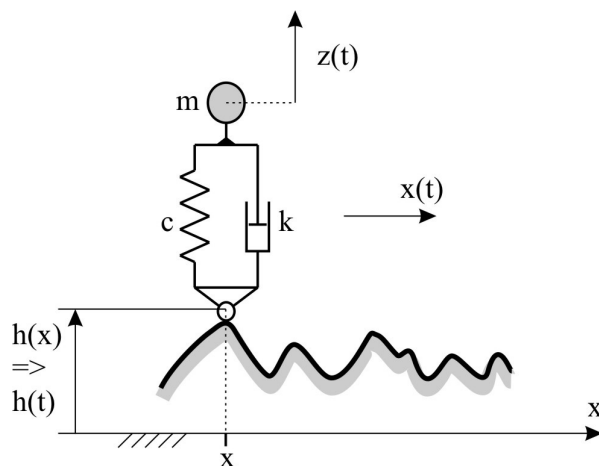
kretanja ne bi bilo neophodno uzeti u obzir strukturom modela koji treba da bude formiran. Opravdano je očekivati da bi u tom slučaju i modelom jednostavnije strukture bila ostvarena zadovoljavajuća tačnost predviđanja. Ukoliko se, međutim, pokaže da je red veličine fluktuacija takav da u toku određenog eksploatacionog režima bitnije utiče na promenu ponašanja pneumatika, to bi značilo i neophodnost uzimanja u obzir ove pojave modelom, što bi u svakom slučaju dovelo do usložnjavanja njegove strukture. Uticaj fluktuacija kontaktne dužine tokom kretanja je, dakle, važan sa stanovišta složenosti modela. U prethodnim razmatranjima već je istaknuta važnost nastojanja da model, u okviru posedovanja kapaciteta za ostvarivanje potrebnih performansi, ima što je moguće jednostavniju strukturu. Stoga ovo pitanje predstavlja jedan od ključnih aspekata ovog istraživanja.

Za ovaj deo istraživanja je, shodno navedenom, postavljen cilj da se dobiju informacije o očekivanom obimu varijacija dužine kontaktne zone pneumatika. Postupak je sproveden računskim putem, korišćenjem odgovarajućeg oscilatornog modela da bi se orijentaciono utvrdile fluktuacije dinamičkog vertikalnog opterećenja pri kretanju traktora na neravnim podlogama. Na osnovu ovih rezultata i prethodno utvrđene veze između vertikalnog opterećenja i defleksije odnosno kontaktne dužine (poglavlje 6.6.2), dolazi se do traženih informacija o očekivanom nivou fluktuacija dužine kontaktne površine tokom kretanja. U funkciji dobijanja merodavnih rezultata, neophodno je, koristeći vrednosti odgovarajućih statističkih pokazatelja, utvrditi merodavne vrednosti sledećih uticajnih faktora:

- karakterističnih uslova kretanja traktora (tipičnih karakteristika podloge i odgovarajućih brzina kretanja),
- osovinskih opterećenja traktora, i
- vrednosti pritiska u pneumatiku u funkciji određivanja koeficijenta krutosti.

Oscilatorni model

Kao oscilatorni model (slika 48) usvojen je model četvrtine vozila bez sistema elastičnog oslanjanja, kod koga jedini elastični element čini pneumatik. Model ima jedan stepen slobode, odnosno oslonjena masa m može da osciluje u vertikalnom pravcu. Pneumatik je predstavljen paralelnom vezom linearne opruge krutosti c i linearnog prigušnog elementa sa viskoznim trenjem koeficijenta k . Izvor oscilatorne pobude predstavljaju neravnine podloge. Kontakt između pneumatika i podloge modeliran je dodirnom u jednoj tački. Filtrirajuća svojstva pneumatika uzeta su u obzir empirijskom modifikacijom frekventnog spektra neravnina podloge, što će u nastavku teksta biti detaljnije komentarisano. Geometrija podloge, definisana kao visina neravnina h u odnosu na usvojeni referentni (nulti) nivo ravne podloge u zavisnosti od položaja duž x -ose, $h(x)$, prevodi se u vremenski domen $h = h(t)$ uzimajući u obzir zakon kretanja u vremenu, $v = v(t)$.



Slika 48. Oscilatorni model: m – oscilujuća masa, $z(t)$ – vertikalno pomeranje mase m u vremenu, $h(x)$ i $h(t)$ – pobuda od neravnina podloge u prostornom i vremenskom domenu, $x(t)$ – zakon kretanja sistema u uzdužnom pravcu (veza između geometrije podloge i pobude u vremenu), c – koeficijent krutosti, k – koeficijent prigušenja

Jednačina kretanja posmatranog oscilatornog modela glasi:

$$m\ddot{z} + k\dot{z} + cz = kh + ch \dots\dots\dots(20.)$$

Značenje oznaka u izrazu (20) prikazano je uz sliku 48.

Ukoliko se kao pobuda posmatranog sistema zada pomeranje $h(t)$ a kao odziv posmatra pomeranje mase $z(t)$, slika 48, tada je funkcija dinamičkog uvećanja (odnos amplitude odziva, označene sa B , i amplitude pobude, označene sa A , pri harmonijskoj pobudi) posmatranog sistema H_B iskazana relacijom [79]:

$$H_B = \frac{B}{A} = \sqrt{\frac{1 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \dots\dots\dots(21.)$$

H_B - funkcija dinamičkog uvećanja

B - amplituda prinudnih harmonijskih oscilacija

A - amplituda harmonijske pobude

$D = \frac{k}{2\sqrt{cm}}$ - tehničko prigušenje

$\eta = \frac{\omega}{\omega_0}$ - pomoćni koeficijent

ω - kružna frekvencija pobude

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \dots\dots\dots - \text{sopstvena kružna frekvencija neprigušenih oscilacija}$$

sistema na slici 48

$$\gamma = \frac{1 - \eta^2}{\eta^2} \dots\dots\dots - \text{pomoćni koeficijent}$$

U posmatranom slučaju, parametar odziva sistema koji je od interesa za dalje proučavanje nije vertikalno pomeranje oscilatorne mase $z(t)$ već vertikalna reakcija između točka i podloge, $F_Z(t)$, čije dinamičke fluktuacije treba proceniti. Usvajajući da položaj $z = 0$ odgovara položaju statičke ravnoteže sistema na slici 48, ukupna vertikalna reakcija može se prikazati kao suma statičkog i dinamičkog dela:

$$F_Z(t) = F_{Z,st} + F_{Z,din}(t) \dots\dots\dots(22.)$$

$F_Z(t)$ - ukupna vertikalna reakcija podloge

$F_{Z,st} = m \cdot g$ - statički udeo u $F_Z(t)$

$F_{Z,din}(t)$ - dinamički udeo u $F_Z(t)$

Jednačina (20) može se, uzimajući u obzir (22), napisati u obliku:

$$m\ddot{z} = k(h - \dot{z}) + c(h - z) = F_{Z,din}(t) \dots\dots\dots(23.)$$

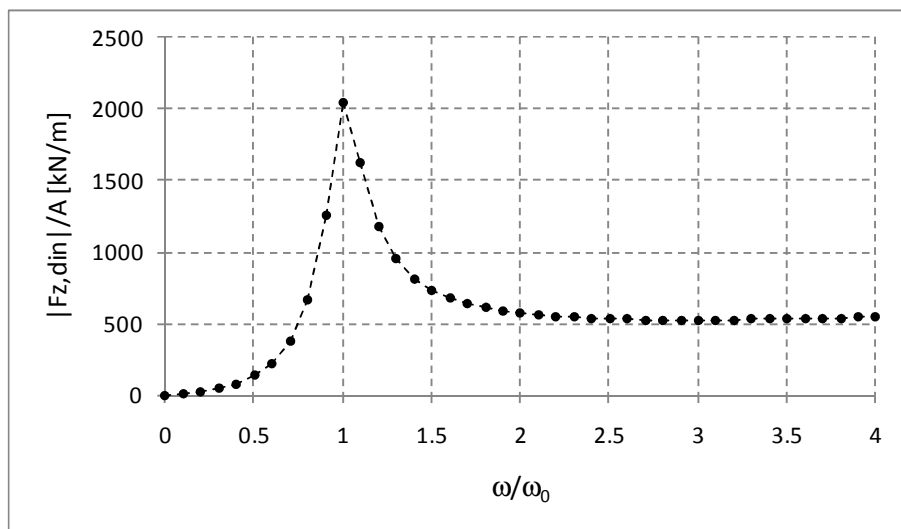
Kada se kao odziv sistema, umesto pomeranja oscilatorne mase, posmatra dinamički udeo vertikalnog opterećenja točka, $F_{Z,din}(t)$, tada se funkcija dinamičkog uvećanja, umesto relacije (21), uzimajući u obzir (23), iskazuje izrazom [56]:

$$H_{Fz} = \frac{|F_{Z,din}|}{A} = c\eta^2 \sqrt{\frac{1 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \dots\dots\dots(24.)$$

H_{Fz} - funkcija dinamičkog uvećanja

$|F_{Z,din}|$ - amplituda dinamičke komponente reakcije podloge

Tipičan tok funkcije (24) za malu vrednost prigušenja, karakterističnu za pneumatik ($D \sim 0,1$), prikazan je na slici 49.



Slika 49. Funkcija dinamičkog uvećanja (24), $c = 400 \text{ kN/m}$, $D = 0,1$

Utvrđivanje karakterističnih uslova kretanja traktora

1. Način saopštavanja oscilatorne pobude vozilu od strane neravnina podloge

Geometrija profila podloga po kojima se pri eksploataciji kreću i vanputna i drumska vozila, ispoljava stohastički karakter. Zbog toga, pri analizi njihovih karakteristika, nije moguće koristiti deterministički pristup, već se mora poći od prikladnih statističkih pokazatelja. Ako se kao osnovni parametar geometrije mikroprofila podloge usvoji zavisnost visine mikroprofila h od položaja x (slika 48), funkcija $h(x)$ se dakle ne može izraziti u analitičkom obliku već je za njenu karakterizaciju kada je u pitanju određeni tip podloge neophodno koristiti odgovarajuće statističke veličine.

Jedan od u literaturi najčešće navođenih i korišćenih statističkih pokazatelja mikroprofila podloge je spektralna gustina snage ([56], [79] itd). Brojnim istraživanjima potvrđeno je da se za praktično sve vrste podloga funkcija gustine spektra snage može u dvostrukoj logaritamskoj razmeri aproksimirati pravom linijom [69] [95] [56]. Relacija kojom se uobičajeno iskazuje ova zavisnost glasi:

$$\Phi_h(\Omega) = \Phi_h(\Omega_0) \cdot \left[\frac{\Omega}{\Omega_0} \right]^{-w} \dots\dots\dots(25.)$$

- Ω [m^{-1}]..... - dužinska kružna frekvencija neravnina podloge
- Ω_0 [m^{-1}]..... - referentna vrednost dužinske kružne frekvencije
- $\Phi_h(\Omega)$ [m^3].... - funkcija spektralne gustine snage neravnina podloge
- $\Phi_h(\Omega_0)$ [m^3]... - vrednost funkcije Φ_h pri referentnoj vrednosti dužinske kružne frekvencije Ω_0 (const.)
- w - mera valovitosti podloge

Prema [56], vrednost funkcije spektralne gustine snage neravnina podloge pri referentnoj vrednosti dužinske kružne frekvencije, $\Phi_h(\Omega_0)$, predstavlja generalnu meru neravnosti podloge. Opisno govoreći, radi se o tome koliko je neka podloga “dobra” ili “loša” sa stanovišta saopštavanja oscilatorne pobude vozilu koje se po njoj kreće. Mera valovitosti, w , određuje međusobni odnos sadržaja harmonika sa manjim i većim vrednostima dužinske kružne frekvencije u spektru. Na osnovu izraza (25), sledi da povećavanje vrednosti $\Phi_h(\Omega_0)$ dovodi do pomeranja krive $\Phi_h(\Omega)$ naviše, dok povećanje faktora w za posledicu ima povećanje strmine nagiba linije.

Za oscilatornu pobudu vozila merodavne su neravnine podloge transformisane iz prostornog u vremenski domen. Ova transformacija se vrši na osnovu brzine kojom se vozilo kreće po podlozi. Ukoliko je brzina kretanja v konstantna, tada se između funkcija gustine spektra snage u vremenskom i prostornom domenu može uspostaviti relacija [56]:

$$\Phi_h(\omega) = \frac{1}{v} \cdot \Phi_h(\Omega) \dots\dots\dots(26.)$$

ω [s^{-1}]..... - kružna frekvencija oscilatorne pobude u vremenskom domenu

Ω [m^{-1}]..... - dužinska kružna frekvencija neravnina podloge u prostornom domenu

$\Phi_h(\omega)$ [m^2s]..... - funkcija gustine spektra snage neravnina podloge za vremenski domen

$\Phi_h(\Omega)$ [m^3]..... - funkcija gustine spektra snage neravnina podloge za prostorni domen

v [m/s] = const - brzina kretanja

Veza između frekvencije u vremenskom i prostornom domenu je data relacijom:

$$\omega = v \cdot \Omega \dots\dots\dots(27.)$$

2. Tipične podloge koje koriste traktori i odgovarajuće brzine kretanja

Zadatak karakterizacije tipičnih podloga po kojima se kreću poljoprivredni traktori u posmatranom kontekstu svodi se na određivanje odgovarajućih vrednosti parametara funkcije spektralne gustine snage date izrazom (25). Takođe je potrebno poznavati tipične brzine kretanja na nekoj podlozi da bi se, koristeći relacije (26) i (27), pobuda transformisala iz prostornog u vremenski domen. U skladu sa postavljenim zadatkom potrebno je izabrati nekoliko reprezentativnih tipova podloga. Pri tome treba poći od činjenice da se rad traktora odvija u okviru dve različite vrste radnih režima:

- agrotehničke operacije, i
- transportne operacije.

Agrotehničke operacije koje se izvode uz pomoć poljoprivrednog traktora prevashodno su vezane za njegovo kretanje po njivi. Njiva stoga treba da bude obuhvaćena kao jedna od tipičnih vrsta podloge u ovom delu istraživanja. Pojam njive posmatran sa aspekta neravnina je, međutim, relativan, jer visina ordinata mikroprofila zavisi od većeg broja faktora, kao što su [69]:

- faza tj. vrsta prethodno sprovedenih agrotehničkih operacija;
- karakteristike zemljišta;
- vrsta kulture koja se uzgaja;
- atmosferski uslovi, itd.

Zbog širokih granica rasipanja parametara podloge iz navedenih razloga, potrebno je bliže odrediti uslove merodavne za klasifikaciju mikroprofila. Prva faza obrade zemljišta, oranje, ostavlja za sobom svakako najizrazitiji oblik neravnina, tako da se pri sledećoj fazi mogu očekivati najintenzivnije oscilacije traktora. Uzevši ovo u obzir, kao merodavna podloga sa aspekta oscilacija traktora pri obavljanju agrotehničkih uslova može da se usvoji njiva nakon izvršenog dubokog oranja [69].

Kada se vozilo kreće po deformabilnom tlu, opravdano je razmotriti u kojoj meri deformacije tla svojim eventualnim uticajem na geometrijsko filtriranje neravnina podloge utiču na frekventni spektar oscilatorne pobude. U posmatranim okolnostima, od interesa je eventualno filtriranje gustine spektra snage neravnina podloge usled njenih deformacija odnosno tonjenja točka pri kretanju. Ovim problemom su se bavili autori radova [64] i [48] uzimajući u obzir principe teramehanike kao što je npr. relacija između opterećenja i tonjenja točka [8]. U radovima je konstatovano da deformabilnost podloge, pod određenim okolnostima, može vidno da izmeni oscilatornu pobudu u poređenju sa kretanjem vozila po nedeformabilnoj podlozi karakterisanoj istom funkcijom gustine spektra snage. Ovaj uticaj, međutim, intenzivno varira u zavisnosti od parametara kao što su vrsta i stanje podloge, vrsta i tip pneumatika, pritisak, osovinsko opterećenje itd. U krajnjoj liniji, međusobni odnosi ovih parametara mogu biti takvi da promena oscilatornih karakteristika vozila dođe do izražaja u veoma maloj, pa i sasvim zanemarljivoj meri. Iz tog razloga u daljem razmatranju će kao merodavan biti uzet neizmenjen frekventni spektar neravnina podloge za uzoranu njivu.

Što se tiče podloga po kojima se vrši poljoprivredni transport, karakteristični su pre svega razni oblici zemljanih poljskih puteva. Takođe se pojavljuju i putevi sa čvrstom kamenom podlogom, najčešće lošeg kvaliteta [69]. Iako su i za ovu grupu podloga karakteristična

značajna rasipanja parametara mikroprofila i zavisnost od vremenskih uslova, podaci publikovani u literaturi vezani za karakteristike pojedinačnih tipičnih podloga pokazuju visok stepen slaganja ([17], [69], rad [37] citiran u [90], [94] citiran u [95]) što olakšava usvajanje tipičnih vrednosti za potrebe ovog proračuna.

Na ovom mestu treba da se pomene i transport na javnim putevima, koji se u novije vreme vrši sa sve većim kapacitetima, zahvaljujući trendu povećanja snage motora a time i brzine kretanja savremenih traktora [31]. Pri tome, kvalitet asfaltnih podloga javnih puteva je daleko bolji od onog karakterističnog za poljoprivredne podloge. U uslovima povećanih brzina kretanja na ravnoj tvrdoj podlozi, sa aspekta oscilatorne pobude traktora kritični su, međutim, drugi parametri, kao što su neuniformnost pneumatika, orebrenje gazećeg sloja itd. [45] [73] što se nalazi izvan okvira posmatranog problema. Transportne operacije na javnim putevima stoga nisu relevantne za razmatranje u posmatranom kontekstu.

Na osnovu rezultata ranijih istraživanja, npr. [69] [37] [90] [94] [95], usvojene su karakteristične vrednosti statističkih parametara mikroprofila karakterističnih podloga prikazane u tabeli 6. Brzine kretanja za pojedine slučajeve izabrane su prema podacima odnosno preporukama o područjima brzina pri različitim tipičnim operacijama u kojima se koristi traktor [16].

Tabela 6. Vrednosti statističkih parametara mikroprofila karakterističnih podloga i odgovarajuće brzine kretanja, $\Omega_0 = 1m^{-1}$

Vrsta podloge	$\Phi_h(\Omega_0)$	w	Brzina kretanja
Uzorana njiva	650 cm ³	1,7	3 m/s
Poljski put, zemljani	300 cm ³	1,6	6 m/s
Poljski put, tvrda podloga lošeg kvaliteta	145 cm ³	1,5	10 m/s

Utvrđivanje merodavnog vertikalnog opterećenja i pritiska za date dimenzije pneumatika

U tabeli 7 prikazana je deklarirana nosivost pneumatika u zavisnosti od pritiska, prema [102]. Vrednosti pritiska date u tabeli predstavljaju minimalne neophodne vrednosti za odgovarajuće nivoe opterećenja.

Tabela 7. Nosivost pneumatika 12.4 R 28 u zavisnosti od pritiska [102]

Pritisak [bar]	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Nosivost [daN]	1050	1095	1140	1185	1230	1275

Pri utvrđivanju merodavnog opterećenja pneumatika datih dimenzija 12.4 R 28 kao osnova je poslužila baza sa podacima o 190 traktora većeg broja renomiranih svetskih proizvođača formirana u okviru istraživanja [58]. Na osnovu podataka iz baze, utvrđeno je da se, u okviru posmatrane grupe traktora, osovinsko opterećenje zadnjih osovina traktora sa naplatkom prečnika 28“ kreće između 1275 i 1930 daN. Prema tome, može se očekivati da uobičajeni rand u kome se kreću vrednosti vertikalnog statičkog opterećenja pojedinačnog točka iznosi približno:

$$G_T = 640 \div 965 \text{ daN} \dots\dots\dots(28.)$$

Prilikom izrade navedene studije takođe je utvrđen približno linearni trend zavisnosti između statičkog opterećenja i dimenzija pneumatika, koji važi za traktore snaga od 30 do 60 kW. Ovaj trend je za slučaj zadnjih pneumatika iskazan relacijom [57]:

$$D_0 = 1039 + 0,23 \cdot G_T \dots\dots\dots(29.)$$

D_0 [mm] - nazivni prečnik točka

G_T [daN] - statičko opterećenje

Nazivni prečnik ispitnog pneumatika iznosi [102]:

$$D_0 = 1250 \text{ mm}$$

Na osnovu relacije (29), ovoj veličini odgovara vertikalno opterećenje točka:

$$G_T = 917 \text{ daN} \dots\dots\dots(30.)$$

Dobijeni rezultat nalazi se unutar gore navedenog opsega (28) dobijenog uvidom u pomenutu bazu podataka. Međusobno slaganje rezultata (28) i (30) doprinosi pretpostavci o njihovoj validnosti.

Vertikalno opterećenje i pritisak pneumatika predstavljaju parametre koji moraju biti prilagođeni jedan drugom po više kriterijuma, kao što su nosivost, otpor kotrljanja, prijanjanje pneumatika za podlogu itd. Stoga se i određivanje merodavne vrednosti pritiska ne može izvršiti odvojeno od vertikalnog opterećenja, i obrnuto. Optimalne vrednosti pritiska u pneumaticima poljoprivrednih traktora mogu varirati u zavisnosti od uslova rada u mnogo većoj meri nego što je to slučaj kod pneumatika drumskih vozila. Pri upotrebi traktora na njivi, glavni kriterijumi za optimalni izbor pritiska definišu se na osnovu mogućnosti realizacije propulzivne sile, smanjenja otpora kotrljanja točka, zaštite zemljišta itd. Pri kretanju na mekoj podlozi, može se smatrati da je optimalna vrednost pritiska ona koja je minimalno dozvoljena za dato vertikalno opterećenje, s obzirom na uslove pod kojima se realizuje sila između točka i podloge, kao i na zahteve vezane za mehaničku zaštitu zemljišta. Sa druge strane, pri kretanju na tvrdoj podlozi, potrebno je koristiti više vrednosti pritiska. Neophodnost ovog pristupa sledi kako zbog smanjenja otpora kotrljanja tako i zbog mogućih oštećenja pneumatika pri većim brzinama [23].

Konačno izabrane vrednosti vertikalnog opterećenja G_T i pritiska za vršenje proračuna su:

$$\underline{G_T = 960 \text{ daN}; p_1 = 1,1 \text{ bar}; p_2 = 1,4 \text{ bar}; \quad - \text{ merodavne vrednosti za proračun}}$$

Ovakav izbor je obrazložen sledećim faktorima:

- Opterećenje od 960 daN leži u intervalu (28), a po vrednosti je takođe blisko vrednosti (30) dobijenog na osnovu linearnog trenda (29);
- Prema tabeli 7, opterećenju od 960 daN približno odgovara nazivni pritisak od 1,1 bar, dok bi vrednost od 1,4 bar prema gornjim razmatranjima mogla odgovarati ovom opterećenju pri kretanju nešto većim brzinama;
- U tačkama 6.6.3 i 6.6.4 vrednosti koeficijenata krutosti i pritiska oscilatornog sistema sa slike 48, potrebnih za sprovođenje proračuna, izračunate su između ostalog za vertikalno opterećenje od 960 daN i pritiske od 1,1 odnosno 1,4 bar (tabela 3 i tabela 4), pa upotreba baš ovih vrednosti doprinosi validnosti rezultata proračuna;
- Slični eksploatacioni režimi korišćeni su i u okviru istraživanja drugih autora, npr. [21] [45] [73] [78].

Izabrane merodavne vrednosti eksploatacionih parametara, zajedno sa podacima o odgovarajućim vrednostima koeficijenata krutosti i prigušenja (ranije izračunatim u tačkama 6.6.3, tabela 3 i 6.6.4, tabela 4) prikazane su objedinjeno u tabeli 8. U tabeli su takođe, informativno, date i odgovarajuće vrednosti tehničkog prigušenja, koje se izračunava prema izrazu [79]:

$$D = \frac{k}{2\sqrt{cm}} \dots\dots\dots(31.)$$

- D [-] - tehničko prigušenje
 m [kg] - elastično oslonjena masa
 c [N/m] - koeficijent krutosti
 k [Ns/m] - koeficijent prigušenja

Tabela 8. Vrednosti statičkog vertikalnog opterećenja i pritiska određene kao merodavne za procenu fluktuacije vertikalne reakcije točka

Statičko vertikalno opterećenje pneumatika G_T	Pritisak [bar]	Koeficijent krutosti, c [kN/m]	Koeficijent prigušenja, k [Ns/m]	Tehničko prigušenje, D [-]
960 daN	1,1	350	3825	0.104
	1,4	428	3588	0.089

Postupak izračunavanja fluktuacije vertikalne reakcije

Informacije o fluktuacijama vertikalne sile na točku F_z mogu se dobiti na osnovu frekventnog spektra ove veličine, odnosno funkcije gustine spektra snage vertikalne sile $\Phi_{F_z}(\omega)$. Funkcija $\Phi_{F_z}(\omega)$ određuje se na osnovu relacije koja povezuje funkcije gustine spektra snage odziva i pobude preko kvadrata odgovarajuće funkcije dinamičkog uvećanja [9]:

$$\Phi_{F_z}(\omega) = H_{F_z}^2 \cdot \Phi_h(\omega) \dots\dots\dots(32.)$$

$\Phi_{F_z}(\omega)$ - funkcije gustine spektra snage dinamičke reakcije između
točka i podloge

H_{F_z} - funkcija dinamičkog uvećanja za dinamičku reakciju i pobudu,
data relacijom (24)

$\Phi_h(\omega)$ - funkcije gustine spektra snage neravnina podloge u
vremenskom domenu

Relacija (32), s obzirom na to da sadrži funkciju gustine spektra snage neravnina stvarne podloge $\Phi_h(\omega)$, primenljiva je, kako je to već više puta isticano, samo kada se vozilo kreće po podlogama kod kojih talasne dužine neravnina u dovoljnoj meri prevazilaze dužinu kontaktne površine. Tada filtrirajuća svojstva pneumatika ne učestvuju u mehanizmu generisanja oscilatorne pobude vozila. Pošto se, međutim, ovde posmatraju vanputne podloge kod kojih ovaj uslov u opštem slučaju nije ispunjen, potrebno je sprovesti modifikaciju pobudne funkcije gustine spektra snage tako da mehanizam filtriranja podloge bude uzet u obzir. Drugim rečima, potrebno je, dakle, umesto stvarnog mikroprofila podloge koristiti efektivni.

Filtrirajuća svojstva pneumatika, čije detaljnije izučavanje i modeliranje predstavljaju osnovni zadatak ovog rada, uzeta su u ovom delu istraživanja u obzir empirijskom modifikacijom frekventnog spektra neravnina stvarnog profila podloge. Filtriranje stvarnog mikroprofila može se aproksimirati prenosnom funkcijom koja obuhvata uticaj brzine kretanja v i polovine dužine kontaktne površine a_0 ([21], [99]):

$$H_n(\omega) = \frac{(1,1 \cdot v)^2}{(1,1 \cdot v)^2 + (a_0 \cdot \omega)^2} \dots\dots\dots(33.)$$

$H_n(\omega)$ - funkcija dinamičkog uvećanja (prenosna funkcija) za stvarni i
efektivni mikroprofil podloge

v - brzina kretanja vozila po neravnoj podlozi

a_0 - polovina dužine kontaktne površine između pneumatika i
podloge

Upotreba aproksimacije (33) je zasnovana na pretpostavci, koja se proverava u ovom delu istraživanja, da fluktuacije dužine kontaktne površine ne utiču značajno na promenu filtrirajućeg ponašanja pneumatika u toku kretanja. Smatra se, naime, da ukoliko ukupno dinamičko opterećenje točka varira oko vrednosti statičkog opterećenja točka, tada će i dužina kontakta varirati oko svoje srednje vrednosti koja odgovara statičkom opterećenju točka [21]. Pretpostavka da ove fluktuacije neće uticati na frekventni spektar efektivnog mikroprofila može se smatrati validnom u dijapazonu fluktuacija kontaktne dužine u kojima nelinearnost filtrirajućih svojstava pneumatika ne dolazi do izražaja u značajnoj meri. Zadatak ovog dela rada je upravo da proveriti da li ova pretpostavka pokriva pretežni spektar realnih slučajeva kretanja traktora po vanputnim podlogama ili samo njegov uži deo. Funkcija gustine spektra snage neravnina efektivnog mikroprofila određuje se koristeći relaciju (33):

$$\Phi_{h,ef}(\omega) = H_n^2 \cdot \Phi_h(\omega) \dots\dots\dots(34.)$$

$\Phi_{h,ef}(\omega)$ - funkcija gustine spektra snage neravnina efektivnog mikroprofila

Korišćenjem efektivnog umesto stvarnog mikroprofila podloge za oscilatornu pobudu vozila, za određivanje fluktuacija vertikalne sile na točku F_z umesto izraza (32) koristi se relacija:

$$\Phi_{F_z}(\omega) = H_{F_z}^2 \cdot \Phi_{h,ef}(\omega) \dots\dots\dots(35.)$$

Na osnovu gustine spektra snage dinamičke komponente vertikalnog opterećenja točka, $\Phi_{F_z}(\omega)$, moguće je izračunati srednje kvadratno odstupanje ove veličine, σ_{F_z} , na osnovu izraza ([9], [79]):

$$\sigma_{F_z} = \sqrt{\int_0^{\infty} \Phi_{F_z} d\omega} \dots\dots\dots(36.)$$

σ_{F_z} - srednje kvadratno odstupanje dinamičke komponente vertikalnog opterećenja točka

Amplituda neravnina podloge predstavlja slučajnu promenljivu sa normalnom raspodelom [79]. Na osnovu izraza (21) i (23), istu osobinu imaju i parametri odziva oscilatornog sistema – pomeranje oslonjene mase $z(t)$ i dinamička komponenta vertikalnog opterećenja $F_z(t)$. Na osnovu osobina normalne raspodele, verovatnoća realizacije neke vrednosti slučajne promenljive koja se ponaša po ovoj zakonitosti može da se poveže sa srednjim kvadratnim odstupanjem, što je numerički prikazano u tabeli 9.

Tabela 9. Veza srednjeg kvadratnog odstupanja i verovatnoće da se vrednost slučajne promenljive nalazi unutar određenog intervala

$P(F_{Z,din} \leq \sigma_{Fz})$	68,3%
$P(F_{Z,din} \leq 2 \cdot \sigma_{Fz})$	95,4%
$P(F_{Z,din} \leq 3 \cdot \sigma_{Fz})$	99,7%

Procene o nivou fluktuacija vertikalnog opterećenja točka, a time i dužine kontaktne površine, dobijaju se izračunavanjem srednjeg kvadratnog odstupanja σ_{Fz} za vrednosti uticajnih parametara date u tabelama 6 i 8.

Na osnovu fluktuacija vertikalne sile, sledi izračunavanje njima odgovarajućih fluktuacija defleksije pneumatika f . Pošto važe relacije:

$$f = F_z/c \dots\dots\dots(37.)$$

$$\sigma(\text{const} \cdot F_z) = |\text{const}| \cdot \sigma(F_z) \dots\dots\dots(38.)$$

Sledi:

$$\sigma_f = \sigma_{Fz}/c \dots\dots\dots(39.)$$

U tački 6.6.2 utvrđeno je da se u određenom dijapazonu vertikalnih opterećenja zavisnost između defleksije f i kontaktne dužine l_{KONT} može aproksimirati linearnom relacijom (15):

$$l_{KONT} [\text{mm}] = 5.141 \cdot f [\text{mm}] + 143.0 \dots\dots\dots(15.)$$

Za standardnu devijaciju proizvoljne veličine X takođe važi i:

$$\sigma(X+\text{const}) = \sigma(X) \dots\dots\dots(40.)$$

Na osnovu (15), (38) i (40) važi:

$$\sigma_{l,kont} = 5,141 \cdot \sigma_f \dots\dots\dots(41.)$$

Zbog međusobnih veza između (37) odn. (39) sa (15) i (41) potrebno je voditi računa o usklađenosti jedinica, npr. uvrštavanjem krutosti c u jedinicama $[\text{N}/\text{mm}]$ u izrazu (37) ili kasnijim pretvaranjem $[\text{mm}]$ u $[\text{m}]$ u (15) i (41).

U tački 6.6.2 utvrđeno je da način izračunavanja kontaktne dužine na osnovu vertikalnog opterećenja koristeći relacije (37) a potom (15) zbog zanemarivanja nelinearnosti koje kriva $f = f(F_z)$ ispoljava u zoni koordinatnog početka vodi do greške u predviđanju l_{KONT}

čiji red veličine dostiže 20 do 30%. U kontekstu upotrebe ovog pristupa u okviru razvoja modela kvazistatičke envelope, ova greška je ocenjena kao neprihvatljiva zbog čega je dalja upotreba pristupa u tom okviru odbačena. Umesto njega, razvijena je nelinearna empirijska relacija (19) koja sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti predviđa kontaktnu dužinu l_{KONT} u zavisnosti od opterećenja i pritiska. U kontekstu ovog proračuna, međutim, relacija (19) nije primenljiva upravo zbog nelinearnosti. Sa druge strane, s obzirom na to da se ovde teži dobijanju okvirnih informacija tj. procene reda veličine rezultata a ne preciznih rezultata proračuna, red veličine greške načinjene povezivanjem relacija (37) i (15) odnosno (39) i (41) može se smatrati prihvatljivim. Takođe, pošto je reč o fluktuacijama oko statičkog opterećenja točka, što pretstavlja zonu dijagrama $f = f(F_Z)$ u kojoj zavisnost između opterećenja i defleksije ispoljava približno linearni karakter, može se očekivati da će učinjena greška time biti i nešto manja. Ova poslednja pretpostavka, međutim, u okviru rada nije bila proverena.

Apksimativni proračun fluktuacija kontaktne dužine izvršen je pomoću standardnog softvera za tabelarna izračunavanja. Kontinualna funkcija gustine spektra snage neravnina izvorne podloge zamenjena je nizom od 1000 diskretnih vrednosti putne kružne frekvencije tako da je usvojeno:

$$\Omega_{\text{MIN}} = 0.1 \text{ m}^{-1} \dots\dots\dots - \text{minimalna vrednost}$$

$$\Omega_{\text{MAX}} = 50 \text{ m}^{-1} \dots\dots\dots - \text{maksimalna vrednost}$$

$$\Delta\Omega = (\Omega_{\text{MAX}} - \Omega_{\text{MIN}})/999 \dots\dots\dots - \text{širina intervala}$$

$$\Omega_i = \Omega_{\text{MIN}} + i \cdot \Delta\Omega; i = 0 \div 999$$

Ovaj interval putnih kružnih frekvencija odgovara intervalu talasnih dužina neravnina od 0.12 do 62.8 m. Integral (36) zamenjen je konačnom sumom:

$$\sigma_{F_Z}^2 \approx \sum \frac{1}{2} [\Phi_{F_Z}(\omega_i) + \Phi_{F_Z}(\omega_{i-1})] \cdot (\omega_i - \omega_{i-1}) \dots\dots\dots (42.)$$

Član $(\omega_i - \omega_{i-1})$ u relaciji (42) može se, na osnovu (27), izračunati i kao:

$$(\omega_i - \omega_{i-1}) = v \cdot \Delta\Omega$$

Rezultati proračuna

Proračun je sproveden za sve tri karakteristične podloge navedene u tabeli 6, njivu, zemljani put i tvrdi poljski put lošeg kvaliteta. Što se tiče merodavnih vrednosti pritiska prikazanih u tabeli 8, pri sprovođenju proračuna usvojeno je da se pritisak od 1,1 bar koristi pri kretanju po njivi i zemljanom putu, dok je za tvrdi put usvojena vrednost pritiska od 1,4 bar. Glavne rezultate proračuna predstavljaju:

- Srednje kvadratno odstupanje dinamičke reakcije σ_{F_Z} ,
- Srednje kvadratno odstupanje defleksije σ_f , i
- Srednje kvadratno odstupanje kontaktne dužine $\sigma_{l_{\text{kont}}}$.

Rezultati proračuna sumarno su prikazani u tabeli 10, zajedno sa vrednostima ulaznih parametara za proračun.

Tabela 10. Rezultati proračuna srednjeg kvadratnog odstupanja dinamičke reakcije σ_{Fz} , defleksije σ_f i kontaktne dužine $\sigma_{l,kont}$ i ulazni parametri prema tabelama 6 i 8

Pritisak: $p_1 = 1,1$ bar		Krutost: $c = 350000$ N/m Prigušenje: $k = 3825$ Ns/m Polovina l_{KONT} : $a_0 = 0.165$ m
Njiva $\Phi_h(\Omega_0) = 650$ cm ³ $w = 1,7$ $v = 3$ m/s		$\sigma_{Fz} = 6466$ N $\sigma_f = 0,018$ m $\sigma_{l,kont} = 0,095$ m
Zemljani put $\Phi_h(\Omega_0) = 300$ cm ³ $w = 1,6$ $v = 6$ m/s		$\sigma_{Fz} = 9349$ N $\sigma_f = 0,027$ m $\sigma_{l,kont} = 0,137$ m
Pritisak: $p_2 = 1,4$ bar		Krutost: $c = 428000$ N/m Prigušenje: $k = 3588$ Ns/m Polovina l_{KONT} : $a_0 = 0.155$ m
Tvrđi put $\Phi_h(\Omega_0) = 145$ cm ³ $w = 1,5$ $v = 10$ m/s		$\sigma_{Fz} = 11699$ N $\sigma_f = 0,027$ m $\sigma_{l,kont} = 0,140$ m

Generalni zaključak

Ukoliko se na rezultate proračuna odnosno na dobijene vrednosti srednjih kvadratnih odstupanja prikazanih u tabeli 10 primeni pravilo "3 σ " (tabela 9), poredeći tako dobijene vrednosti sa rezultatima ispitivanja međusobnih zavisnosti vertikalne sile, defleksije i kontaktne dužine prikazanim u tački 6.6.2, može se zaključiti da očekivane dinamičke fluktuacije posmatranih veličina značajno prevazilaze rang u kome se njihove međuzavisnosti mogu opisati linearnim relacijama. Samim tim rezultati proračuna se ne mogu smatrati potpuno tačnim u numeričkom smislu, pa ipak njihova vrednost je u tome što jasno ukazuju na to da u opštem slučaju kretanja traktora po vanputnoj podlozi treba računati sa značajnim varijacijama filtrirajućih svojstava pneumatika. Stoga se može zaključiti da je pri razvoju empirijskog modela envelope kretanja čiji zadatak jeste između ostalog da obuhvati širi spektar mogućih uslova pobude opravdano uvesti tekuću vrednost kontaktne dužine kao jedan od ulaznih parametara modela. Ovo, sa druge strane, zahteva postojanje povratne sprege u komunikaciji između modela envelope kretanja i modela elastične strukture (videti sliku 1, tačka 1.3), s obzirom na to da se u okviru modela elastične strukture izračunava vertikalno opterećenje na osnovu kog se dalje računa kontaktna dužina.

7.6 Prikupljanje empirijskih podataka u funkciji razvoja modela

7.6.1 OSNOVE ZA PLANIRANJE EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA

Nakon sprovođenja pripremnog dela istraživanja opisanog u prethodnom delu ovog poglavlja i uvida u karakter dobijenih rezultata, stvoreni su uslovi za sprovođenje dela eksperimentalnih ispitivanja ključnih sa aspekta samog razvoja empirijskog modela. U ovom delu vršeno je merenje odziva tj. kvazistatičke envelope kretanja pneumatika za različite uslove (različiti geometrijski parametri prepreke i različite vrednosti pokazatelja eksploatacionog režima pneumatika). Merenja su vršena sa ciljem da se prikupe empirijski podaci za uspostavljanje empirijskog modela. U tu svrhu potrebno je formirati takav set empirijskih podataka koji u što potpunijoj meri reprezentuje relevantna svojstva modeliranog fenomena. U funkciji realizacije ovog cilja neophodno je ulazne parametre varirati u određenom dijapazonu i sa određenom rezolucijom, što predstavlja problem čije rešenje nije jednoznačno određeno, niti su kriterijumi za iznalaženje rešenja unapred poznati u eksplicitnom obliku. Sa druge strane, međutim, postojeća fizičko-tehnička ograničenja kapaciteta mernog postrojenja uslovljavaju mogućnosti za izbor parametara koje su stoga relativno ograničene. Način izbora i podešavanja eksperimentalnih parametara u okviru postojećih mogućnosti opisani su u nastavku. Nakon izvođenja fizičkog eksperimenta, razvijen je pomoćni model kvazistatičke envelope zasnovan na aproksimaciji fizičke strukture pneumatika, kako bi se putem njegove primene, odnosno sprovođenjem virtuelnih eksperimenata – simulacija, proširio skup empirijskih podataka i time u određenoj meri prevazišla ograničenja postojeća u okviru realnih uslova.

7.6.2 PLAN IZVOĐENJA MERENJA

Utvrđivanje merodavnih vrednosti dužine kontaktne površine pneumatika

Formiranje plana merenja započinje sa određivanjem merodavnih vrednosti pokazatelja eksploatacionog režima pneumatika, koje je prema rezultatima istraživanja prikazanim u tački xx sa zadovoljavajućom tačnošću moguće iskazati kroz kontaktnu dužinu l_{KONT} kao jedinstveni pokazatelj. Potrebno je, dakle, definisati varijacije ovog parametra, što se ostvaruje varijacijama pritiska pri konstantnom vertikalnom opterećenju. Ovaj pristup je ocenjen kao najprihvatljiviji pri datoj konfiguraciji ispitnog postrojenja.

Ograničenja u pogledu mogućnosti za varijacije l_{KONT} diskutovana su u tački 7.3. Utvrđivanje granica u kojima je uopšte moguće varirati l_{KONT} utvrđena je shodno zaključcima izvedenim u tom delu rada. U nastavku se pošlo od rezultata i zaključaka dela rada obuhvaćenog tačkama 7.3 i 7.5 gde je pokazano sledeće:

- očekivana vrednost eksploatacionog opterećenja pogonskog traktorskog pneumatika dimenzija 12.4R28 iznosi orijentaciono 918 daN;
- ovoj vrednosti je bliska vrednost vertikalnog opterećenja od 960 daN što je jedna od vrednosti koja odgovara konfiguraciji mernog postrojenja;
- opterećenju datog pneumatika od 960 daN približno odgovara vrednost eksploatacionih pritisaka u intervalu od 1,1 do 1,4 bar.

Dalje, na osnovu empirijske relacije (19), tačka 6.6.2, pri opterećenju od 960 daN graničnim vrednostima navedenog intervala pritiska približno odgovaraju sledeće vrednosti kontaktne dužine:

$$G_T = 960 \text{ daN}, p = 1,1 \text{ bar} \Rightarrow l_{\text{KONT}} \approx 360 \text{ mm}$$

$$G_T = 960 \text{ daN}, p = 1,4 \text{ bar} \Rightarrow l_{\text{KONT}} \approx 330 \text{ mm}$$

Na osnovu dijagrama na slici 35, takođe u okviru tačke 6.6.2, vidi se da se pri varijacijama pritiska od 0,8 do 2,0 bar kontaktna dužina kreće približno u intervalu 280÷400 mm.

Usvajajući navedene podatke kao polaznu osnovu za izbor dijapazona merodavnih vrednosti kontaktne dužine za ispitivanje odziva pneumatika u smislu kvazistatičke envelope kretanja i konkretnih vrednosti kontaktne dužine unutar intervala, pristupilo se iterativnom postupku podešavanja pritiska u funkciji dobijanja željene kontaktne dužine na način opisan u tački 7.3. Kao konačan rezultat usvojene su sledeće merodavne vrednosti kontaktne dužine:

- $l_{\text{KONT}1} = 380 \text{ mm}$ (vrednost pritiska približno 0,7 bar)
- $l_{\text{KONT}2} = 330 \text{ mm}$ (vrednost pritiska približno 1,1 bar)
- $l_{\text{KONT}3} = 280 \text{ mm}$ (vrednost pritiska približno 1,9 bar)

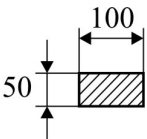
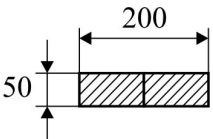
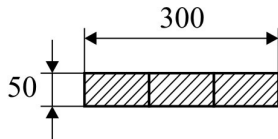
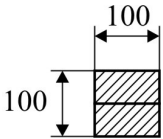
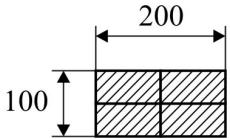
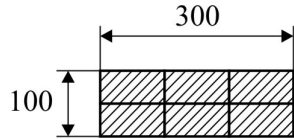
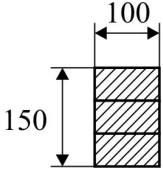
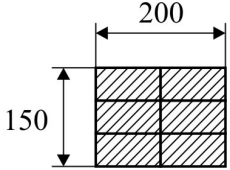
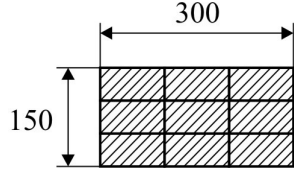
S obzirom na to da je sama širina intervala varijacija l_{KONT} relativno mala, deljenje na veći broj podintervala ocenjeno je kao nesvrishodno.

Određivanje geometrije ispitne podloge

U eksperimentalnim ispitivanjima korišćena je fundamentalna forma prepreke pravougaonog poprečnog preseka. Upotrebna vrednost i osnovna svojstva ove forme diskutovani su u okviru tačke 3.4.3. Rezultati dobijeni upotrebom ovakve forme srazmerno su laki za interpretaciju i međusobno poređenje; takođe, procenjeno je da za prvi korak u izučavanju načina primene neuronskih mreža za modeliranje kvazistatičke envelope nije prikladno koristiti složenije forme profila dok se ne dođe do osnovnih rezultata i zaključaka u radu sa jednostavnijim formama. Takođe ovaj profil ima i značajnu praktičnu primenu jer se u svrhu standardizacije kao i zbog jednostavnosti primene u realnim i virtuelnim ispitivanjima često koristi za produkciju ispitnih podloga (npr. u radovima [3], [10], [73], [74], [78], [98]) pa je stoga opravdano da bude obuhvaćen funkcionalnošću modela. Na kraju, jednostavnost izrade i korišćenja, komercijalna raspoloživost i niska cena kada se za izradu prepreka koriste delovi načinjeni od drvene građe dodatno su išli u prilog ovom izboru.

Korišćene su prepreke od drvenih blokova, standardne dimenzije poprečnog preseka 50×100 mm. Različitim kombinovanjem jediničnih prepreka formiran je veći broj prepreka sa različitim dimenzijama. U funkciji efikasnije obrade eksperimentalnih podataka, uvedene su oznake pojedinačnih prepreka. Ove oznake i dimenzije prikazane su u tabeli 11. Kako bi se ivice drvenih blokova zaštitile od habanja usled većeg broja izvođenja eksperimenata, elementi su dodatno zaštićeni zavrtnjanski vezanom oplatom od čeličnog lima debljine 3 mm.

Tabela 11. Dimenzije i oznake korišćenih prepreka

		
Prepreka "P1"	Prepreka "P2"	Prepreka "P3"
		
Prepreka "P4"	Prepreka "P5"	Prepreka "P6"
		
Prepreka "P7"	Prepreka "P8"	Prepreka "P9"

Zbog tehničkih problema za koje u okviru trajanja istraživanja nije pronađeno adekvatno rešenje, izostalo je ispitivanje za prepreke P7 i P9.

Napominje se da su prilikom eksperimentalnog rada takođe, u funkciji utvrđivanja pravaca daljih istraživanja, započeta određena preliminarna ispitivanja i sa drugačijim oblicima geometrije profila podloge.

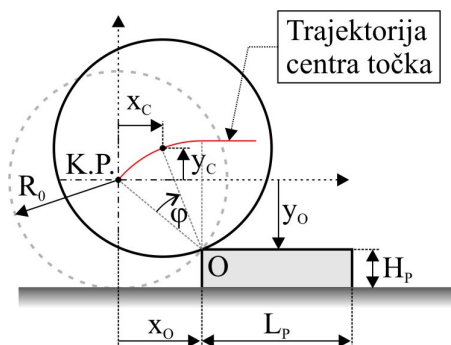
Kombinacije različitih prepreka i vrednosti kontaktne dužine

Kombinujući 7 prepreka iz tabele 11 (usled izostanka korišćenja prepreka "P7" i "P9") sa tri vrednosti kontaktne dužine, utvrđen je konačan plan merenja. Pojedini setovi podataka takođe su, u funkciji postupaka naknadne obrade, označeni prema tabeli 12.

Tabela 12. Oznake setova podataka dobijenih eksperimentalnim merenjima

VREDNOSTI KONTAKTNE DUŽINE					
$l_{KONT1} = 380 \text{ mm}$		$l_{KONT2} = 330 \text{ mm}$		$l_{KONT3} = 280 \text{ mm}$	
Prepreka	Oznaka seta podataka	Prepreka	Oznaka seta podataka	Prepreka	Oznaka seta podataka
P1	"A"	P1	"H"	P1	"O"
P2	"B"	P2	"I"	P2	"P"
P3	"C"	P3	"J"	P3	"Q"
P4	"D"	P4	"K"	P4	"R"
P5	"E"	P5	"L"	P5	"S"
P6	"F"	P6	"M"	P6	"T"
P8	"G"	P8	"N"	P8	"U"

U tački 7.3 obrazložena je nemogućnost korišćenja šireg dijapazona vrednosti kontaktne dužine pri eksperimentalnom ispitivanju. Posledica je relativno uzak dijapazon varijacije ovog parametra, što sužava reprezentativnost tako dobijenog seta empirijskih podataka u smislu širine dijapazona u kom podaci odslikavaju ponašanje posmatranog sistema. Posebno je uočljiv nedostatak podataka za male vrednosti kontaktne dužine, koje odgovaraju veoma malim opterećenjima točka. Ovakvi slučajevi se, međutim, redovno javljaju pri intenzivnijim fluktuacijama dinamičkog opterećenja točka, kako sledi iz rezultata numeričke procene fluktuacija kontaktne dužine prema tački 7.5. Da bi se delimično kompenzovao nedostatak rezultata ispitivanja za mala opterećenja, set empirijskih podataka dopunjen je računskim rezultatima kvazistatičke envelope za slučaj krutog točka, što bi odgovaralo nultoj vrednosti kontaktne dužine $l_{KONT} = 0$. Ovaj slučaj odgovara situaciji kada vertikalno opterećenje točka usled fluktuacija padne na 0 ($G_T = 0$), pri čemu još uvek postoji kontakt između točka i prepreke. Ovakva situacija šematski je prikazana na slici 50. Tekuće koordinate centra krutog točka pri kotrljanju preko prepreke predstavljaju geometrijsko mesto tačaka koje definišu kvazistatičku envelopu krutog točka. Početak koordinatnog sistema (K.P.) nalazi se u tački koja odgovara položaju centra točka pri uspostavljanju inicijalnog kontakta sa preprekom. Tačka kontakta točka i prepreke je tačka O, odnosno ivica prepreke. Od momenta uspostavljanja inicijalnog kontakta pa do trenutka kada se centar točka nađe na vertikalnoj osi koja prolazi kroz tačku O, centar točka se kreće po kružnom luku radijusa jednakog radijusu točka R_0 . Nakon toga točak nastavlja da se kotrlja po gornjoj površini prepreke, pri čemu je njegova trajektorija horizontalna prava linija.



Slika 50. Geometrijski parametri pri kotrljanju krutog točka preko prepreke sa pravougaonim poprečnim presekom: R_0 – radijus točka; K.P. – koordinatni početak; O – tačka kontakta točka sa preprekom; L_p , H_p – dužina i visina prepreke respektivno; x_0 , y_0 – koordinate tačke kontakta u odnosu na K.P.; x_c , y_c – koordinate tekućeg položaja centra točka u odnosu na K.P.; φ – tekući ugao zakretanja točka oko poprečne ose

Prema oznakama sa slike 50 sledi:

$$x_0 = \sqrt{2R_0 \cdot H_p - H_p^2} \dots\dots\dots(43.a)$$

$$y_0 = R_0 - H_p \dots\dots\dots(43.b)$$

Ako se kao nezavisno promenljiva koordinata usvoji x_c , y_c se izračunava iz relacije:

$$y_c = \begin{cases} y_0 + \sqrt{R_0^2 - (x_c - x_0)^2}, & x_c \leq x_0 \\ H_p, & x_c > x_0 \end{cases} \dots\dots\dots(44.)$$

U skladu sa načinom obrade podataka opisanim u okviru tačke 7.2, kretanje točka se posmatra do trenutka u kome su vertikalna osa simetrije točka i vertikalna osa simetrije prepreke podudarne. Maksimalna vrednost koordinate x_c stoga se određuje iz izraza:

$$x_{c,MAX} = x_0 + L_p/2 \dots\dots\dots(45.)$$

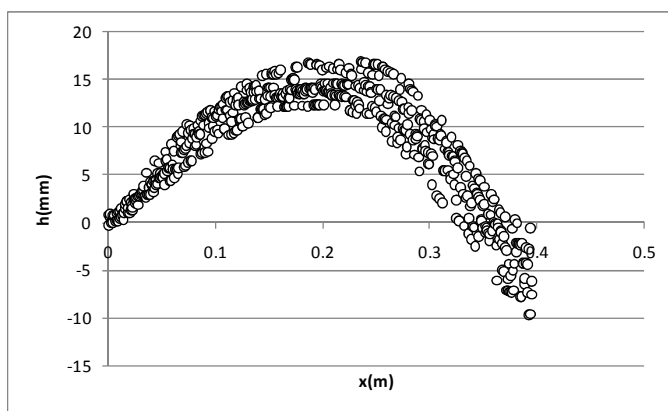
Na osnovu relacije (44), set podataka za obuku je dopunjen rezultatima simulacije kotrljanja krutog točka preko prepreka nabrojanih u tabeli 12. Setovi podataka dobijeni na ovaj način označeni su dodavanjem oznake "0" na kraj oznake predmetne prepreke. Oznake dobijene ovakvim sistemom označavanja navedene su u tabeli 13.

Tabela 13. Oznake setova podataka dobijenih numeričkom simulacijom kotrljanja krutog točka ($l_{KONT} = 0$) preko prepreka navedenih u tabeli 12

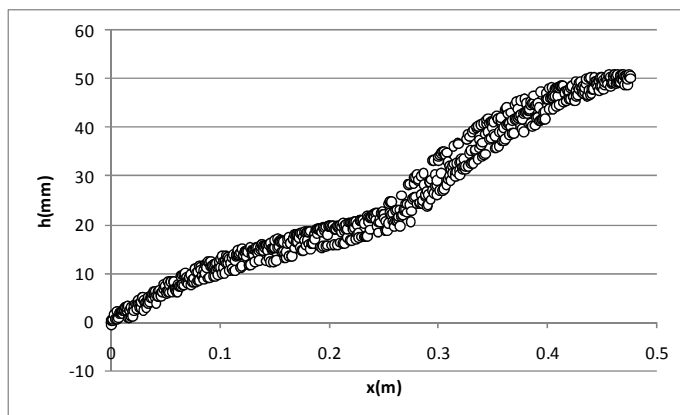
Prepreka	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P8
Oznaka seta podataka	"P10"	"P20"	"P30"	"P40"	"P50"	"P60"	"P80"

7.6.3 REZULTATI ISPITIVANJA

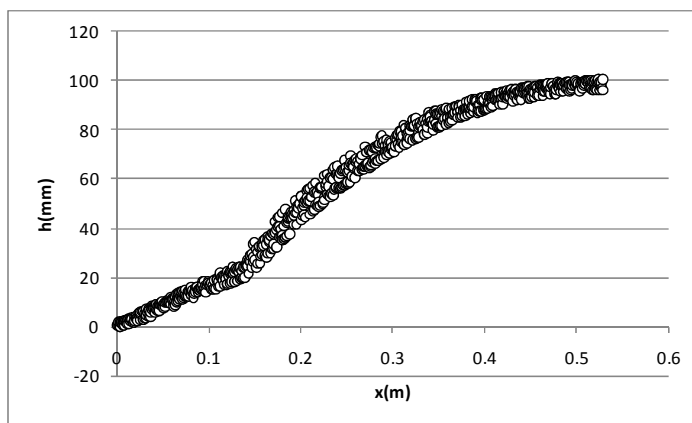
U skladu sa teorijskim razmatranjima iz tačke 3.4.3 i slikama 9, 10 i 11, sa promenom parametara tj. ulaznih podataka (l_{KONT} , visina prepreke H_P , dužina prepreke L_P) dolazi do varijacije forme, dimenzija i geometrijskih parametara kvazistatičke envelope. Tri karakteristična rezultata ("A", "J" i "T" iz tabele 12) grafički su prikazana na slikama 51, 52 i 53, dok su preostali rezultati dati u prilogu 1. Prikazani rezultati dobijeni su obradom izvornih mernih podataka prema postupku opisanom u tački 7.2. Forma i ponašanje kvazistatičke envelope pri promenljivim parametrima ispoljava saglasnost sa ranije publikovanim rezultatima drugih autora ([74], [98]), koji su merenja vršili sa pneumaticima drumskih vozila. Za analizu rezultata prikladno je koristiti geometrijske parametre kvazistatičke envelope za slučaj singularne pravougaone neravnine, definisane u okviru tačke 3.4.3, slika 10. Sa povećanjem kontaktne dužine l_{KONT} , povećava se i ukupna dužina odziva L , a tačka diskontinuiteta A se pomera u smeru kretanja dalje od početne tačke, što vodi smanjenju maksimalne visine odziva H_{MAX} . Ovo se može uočiti poređenjem rezultata prikazanim na slikama 52 i 53. Pri daljem povećanju kontaktne dužine, nakon neke vrednosti visina odziva na središnjem delu hoda točka preko prepreke, H_{SR} , postaje manja od maksimalne visine H_{MAX} . Ovakav slučaj ilustrovan je rezultatom ispitivanja prikazanim na slici 51. Na slikama 52 i 53 prikazani su rezultati tipični za slučaj manjih vrednosti kontaktne dužine, kod kojih se maksimalna visina odziva postiže na sredini, odnosno $H_{SR} = H_{MAX}$.



Slika 51. Rezultati merenja za slučaj "A": $l_{KONTI}=380\text{mm}$, prepreka "P1" ($L_P \times H_P = 100\text{mm} \times 50\text{mm}$)



Slika 52. Rezultati merenja za slučaj "J": $l_{KONT2}=330mm$, prepreka "P3" ($L_P \times H_P = 300mm \times 50mm$)



Slika 53. Rezultati merenja za slučaj "T": $l_{KONT3}=280mm$, prepreka "P3" ($L_P \times H_P = 300mm \times 100mm$)

7.6.4 IZRAČUNAVANJE MERNE NESIGURNOSTI

Merna nesigurnost merene veličine predstavlja parametar rezultata merenja koji u velikoj meri određuje njihov kvalitet i iskoristivost [76]. Ova veličina se izračunava iz relacije:

$$u(x) = \frac{s}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(46.)$$

s - procena standardne devijacije

n - broj merenja

Procena standardne devijacije s u gornjoj relaciji određuje se iz izraza [76]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots (47.)$$

x_i - pojedine vrednosti rezultata merenja

\bar{x} - aritmetička sredina rezultata merenja

Kao karakteristični geometrijski parametri kvazistatičke envelope za koje je izvršen proračun procene standardne devijacije odnosno merne nesigurnosti izabrani su:

- L_S – uzdužno rastojanje tačke diskontinuiteta od mesta početka odziva pneumatika – L_S
- H_S – visina tačke diskontinuiteta
- H_{SR} – visina efektivnog mikroprofila u središnjoj tački

Definicija parametara L_S , H_S i H_{SR} date su u okviru tačke 3.4.3 (slika 10), kao i u tački 7.3 (slika 42). Rezultati proračuna procene standardne devijacije i merne nesigurnosti prikazani su u tabeli 14.

Tabela 14. Procena standardne devijacije (s_x) i merne nesigurnosti (u_x) za parametre L_S , H_S i H_{SR} (oznake setova podataka prema tabeli 12, tačka 7.6.2)

Set podataka	s_{L_S} [mm]	u_{L_S} [mm]	s_{H_S} [mm]	u_{H_S} [mm]	$s_{H_{SR}}$ [mm]	$u_{H_{SR}}$ [mm]
A	0	0	2.6	0.8	2.6	0.8
B	56.4	17.8	1.9	0.6	7.6	2.4
C	19.0	6.0	1.4	0.4	1.4	0.5
D	7.8	2.5	1.7	0.5	2.8	0.9
E	8.1	2.6	2.6	0.8	6.7	2.1
F	15.0	4.7	2.4	0.8	3.0	1.0
G	5.2	1.6	1.7	0.5	3.1	1.0
H	30.1	9.5	3.2	1.0	6.4	2.0
I	9.1	2.9	0.9	0.3	2.2	0.7
J	9.8	3.1	0.8	0.3	0.8	0.2
K	7.8	2.5	2.2	0.7	6.2	2.0
L	8.6	2.7	2.4	0.8	2.8	0.9
M	4.4	1.4	1.8	0.6	0.5	0.2
N	8.7	2.8	2.4	0.8	3.8	1.2

Set podataka	s_{Ls} [mm]	u_{Ls} [mm]	s_{Hs} [mm]	u_{Hs} [mm]	s_{Hsr} [mm]	u_{Hsr} [mm]
O	12.1	3.8	1.6	0.5	3.3	1.0
P	7.9	2.5	1.2	0.4	0.4	0.1
Q	10.0	3.2	1.0	0.3	0.3	0.1
R	6.1	1.9	2.7	0.8	4.0	1.3
S	5.7	1.8	1.4	0.4	1.6	0.5
T	7.3	2.3	2.0	0.6	1.7	0.5
U	5.7	2.0	1.3	0.5	1.0	0.4

7.7 Primena modela sa radijalnim i međuradijalnim oprugama za proširenje skupa empirijskih podataka

7.7.1 ULOGA FIZIČKOG MODELA U PRIKUPLJANJU EMPIRIJSKIH PODATAKA

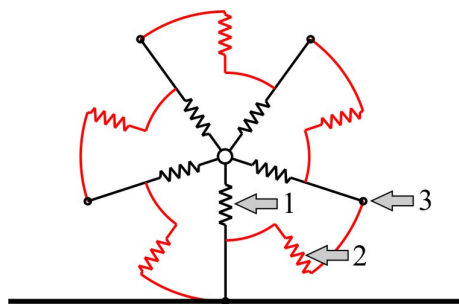
U prethodnom delu rada prikazani su postupak i rezultati prikupljanja empirijskih podataka čija je svrha korišćenje u okviru razvoja empirijskog modela, za koje je korišćen odgovarajući postupak uz primenu raspoloživog ispitnog postrojenja. Infrastrukturalna ograničenja prisutna pri izvođenju eksperimenta, međutim, dovela su do toga da je broj prikupljenih mernih podataka u pogledu varijacija radnog režima i geometrijskih parametara podloge relativno mali. Takođe, korišćene vrednosti dužine kontaktne površine leže u jednom relativno uzanom intervalu. Posebno je izražen problem nedostatka eksperimentalnih podataka za slučaj kada kontaktna dužina teži nuli, što je slučaj koji se u praksi zbog fluktuacija vertikalne reakcije (koje mogu dovesti i do odvajanja točka od podloge) može dogoditi sa visokom verovatnoćom, što je i pokazano postupkom numeričke procene fluktuacije kontaktne dužine pri tipičnim slučajevima kretanja traktora na poljoprivrednim podlogama (tačka 7.5).

Da bi se prevazišli navedeni nedostaci, odlučeno je da se broj eksperimentalnih rezultata poveća upotrebom nekog od modela zasnovanih na fizičkoj strukturi pneumatika opisanih u okviru pregleda dosadašnjih istraživanja (tačka 2.2). Pod pretpostavkom adekvatne strukture modela i ispravne parametrizacije, ovakav model može sa zadovoljavajućom tačnošću da predvidi odziv pneumatika u uslovima relevantnim za predmetno istraživanje¹³. Jednom razvijen i parametrizovan, model stoji na raspolaganju za dobijanje eksperimentalnih rezultata za proizvoljne vrednosti ulaznih parametara što omogućava popunjavanje skupa eksperimentalnih rezultata praktično proizvoljnim brojem tačaka.

Imajući u vidu svrhu primene i zahtevnost postupka aplikacije i parametrizacije modela, kao najprikkladnija opcija izabran je model sa radijalnim i međuradijalnim oprugama, slika 54. Radijalno raspoređene opruge modeliraju radijalnu elastičnost pneumatika, dok je svrha njihovog međusobnog povezivanja preko međuradijalnih opruga modeliranje

¹³ Ova osobina modela potvrđena je u literaturi. Odgovarajuće reference citirane su u okviru poglavlja u kom je dat pregled stanja u oblasti modeliranja pneumatika.

savojne krutosti oboda pneumatika. U svrhu preglednosti crteža, model prikazan na slici 54 sastoji se od veoma malog broja diskretnih pozicija. U praksi je, za postizanje veće tačnosti, neophodno koristiti znatno finiju diskretizaciju elastične strukture.

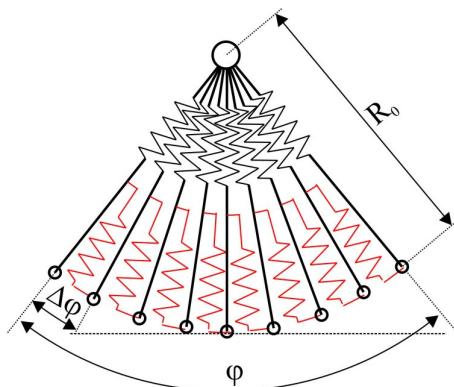


Slika 54. Model pneumatika sa radijalnim i međuradijalnim oprugama: 1 – radijalna opruga, 2 – međuradijalna opruga, 3 – element za kontakt sa podlogom

Na ovom mestu se još jednom podvlači suštinska razlika između fizičkog modela, razvijenog u svrhu obezbeđivanja dodatnih empirijskih podataka, i empirijskog modela čiji razvoj predstavlja cilj disertacije, koja se zasniva pre svega na brzini izvršavanja a potom i na jednostavnosti aplikacije i parametrizacije.

7.7.2 APLIKACIJA MODELA SA RADIJALNIM I MEĐURADIJALNIM OPRUGAMA

Uz oslanjanje na opis i preporuke za razvoj modela sa radijalnim i međuradijalnim oprugama navedene u referencama [3] odnosno [93], u radu je razvijena sopstvena verzija aplikacije modela. Prvi korak u razvoju bio je zamena kružnog oblika točka lučnim segmentom, kao što je prikazano na slici 55.



Slika 55. Geometrijska forma modela sa radijalnim i međuradijalnim oprugama: R_0 – slobodni radijus pneumatika, φ - ugaona širina segmenta, $\Delta\varphi$ - ugao između susednih radijalnih elemenata

S obzirom na to da je kružna forma stvarnog pneumatika u usvojenom pristupu zamenjena segmentom, kotrljanje točka je u okviru modela predstavljeno translatorskim klizanjem

segmenta po podlozi. Pri tome se smatra da je podloga glatka odnosno horizontalna interakcija između gazeće površine točka i podloge je izvan fokusa razmatranja. Kvazistatička envelope se dobija pri inkrementalnom uzdužnom pomeranju segmenta uz određivanje položaja statičke ravnoteže za svaki novi položaj. Dobijena kriva tako nema kontinualni karakter već je reprezentovana kroz niz tačaka dobijenih simulacijom.

S obzirom na to da se simulacija zasniva na nalaženju ravnotežnog položaja na osnovu opštih statičkih uslova ravnoteže, uvođenje prigušnih elemenata u sistem ne bi imalo svrhu. Zbog toga ovakvi elementi nisu uključeni u model.

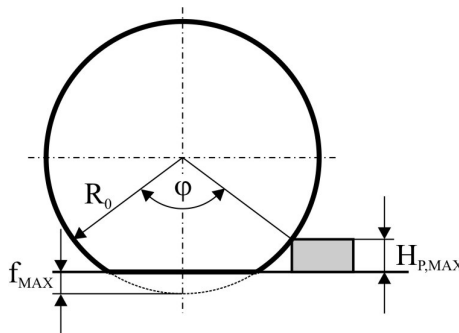
Osnovni geometrijski parametri modela prikazanog na slici 55 su:

- slobodni (nedeformisani) radijus pneumatika R_0 , i
- ugaona širina zahvata φ

Slobodni radijus R_0 je karakteristika ispitivanog pneumatika. Prema katalogu [102] za ispitivani pneumatik vrednost ovog parametra iznosi:

$$R_0 = 625 \text{ mm}$$

Ugaona širina zahvata određuje se okvirno na osnovu usvojenih maksimalnih vrednosti ugiba i visine prepreke, prema slici 56.



Slika 56. Geometrijski parametri za određivanje potrebne ugaone širine zahvata φ :
 R_0 – slobodni radijus pneumatika, f_{MAX} – maksimalna defleksija pneumatika, $H_{P,MAX}$ – maksimalna visina prepreke

Sa slike 56 se vidi da je za određivanje potrebne ugaone širine zahvata φ potrebno, uz podatak o slobodnom radijusu R_0 , poznavati očekivane vrednosti maksimalne defleksije koja se javlja pri eksperimentu kao i maksimalne visine prepreke koja se koristi. Prema rezultatima ispitivanja karakteristika pneumatika pri statičkim uslovima opterećenja, najveća ostvarena defleksija je iznosila nešto manje od 70 mm pri pritisku od 0.8 bar i pri vertikalnom opterećenju od 1400 daN (tačka 6.6.1, slike 32 i 35). U dinamičkim uslovima, međutim, moguća je pojava i nešto većih vrednosti defleksije što je potrebno uzeti u obzir pri proceni potrebne vrednosti ugaone širine φ . Što se tiče maksimalne visine prepreke, pri izvođenju fizičkog eksperimenta granična vrednost ovog parametra za koji je bilo moguće sprovesti eksperiment je iznosila $H_{P,MAX} = 150$ mm. Za virtuelni model ne postoje ograničenja u tom pogledu. Kako je, međutim, procenjeno da singularne prepreke visine

veće od 150 mm nisu merodavan slučaj za praksu, odlučeno je da se pri određivanju parametra φ zadrži ova vrednost.

Prema slici 56 važi relacija:

$$\varphi = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{f_{\text{MAX}} + H_{\text{P,MAX}}}{R_0}\right) \dots\dots\dots (48.)$$

U posmatranim uslovima, odnosno za gore navedene vrednosti ostalih parametara dobija se orijentaciono:

$$\varphi \geq 100^\circ$$

U funkciji povećanja fleksibilnosti modela odlučeno je da ugao φ takođe figuriše kao promenljivi parametar.

Ugao između dva susedna radijalna elementa izračunava se iz relacije:

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi}{N-1} \dots\dots\dots (49.)$$

$\Delta\varphi$- ugao između dva susedna radijalna elementa

φ- ugaona širina zahvata

N.....- broj radijalnih elemenata

Validnost rezultata dobijenih primenom modela u suštinskoj meri zavisi od finoće diskretizacije elastične strukture pneumatika, odnosno od broja radijalnih elemenata N. Može se očekivati da sa porastom N raste stepen slaganja predviđanja modela sa rezultatima fizičkog eksperimenta. U opštem slučaju, međutim vrednost N za koje se dobijaju prihvatljivi rezultati nije unapred poznata. Stoga je usvojeno da N figuriše kao jedan od parametara modela čija optimalna vrednost može da se odredi eksperimentalnim putem.

Da bi se obezbedilo da jedan od radijalnih elemenata bude u vertikalnom položaju kako bi se obezbedilo da granični geometrijski uslovi kontakta sa podlogom budu u skladu sa vrednošću slobodnog radijusa, potrebno je usvojiti da N bude neparan broj. Sa povećanjem vrednosti N, sa druge strane, greška koja se čini izostavljanjem ovog principa postaje zanemarljiva.

Osim geometrije, kroz parametre modela je potrebno obuhvatiti i mehanizme deformisanja pojedinih radijalnih i međuradijalnih elemenata pod dejstvom aksijalnih opterećenja, odnosno krutost opruga i njenu eventualnu nelinearnost odnosno zavisnost od veličine deformacije.

Kombinujući iskustva drugih autora ([3], [93]) i preliminarne rezultate dobijene tokom postupka razvoja aplikacije modela, poređenjem rezultata simulacije sa rezultatima merenja, usvojen je koncept po kom krutost radijalnih opruga ima degresivan karakter

odnosno opada sa porastom deformacije, dok je ponašanje međuradijalnih elemenata linearno odnosno njihova krutost je konstantna:

$$F_{Rad,i} = c_{Rad1} \cdot f_{Rad,i} - c_{Rad2} \cdot f_{Rad,i}^2 \dots\dots\dots (50.a)$$

$$F_{MRad,i} = c_{MRad} \cdot f_{MRad} \dots\dots\dots (50.b)$$

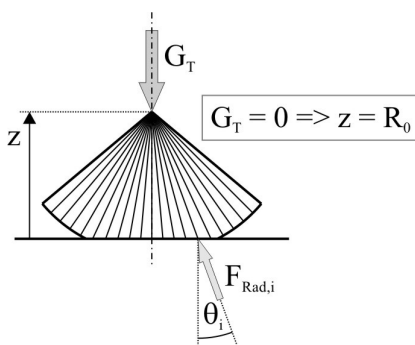
$F_{Rad,i}, F_{MRad,i} \dots\dots\dots$ - sila u i-tom radijalnom odnosno međuradijalnom elementu, respektivno

($F_{Rad,i} \geq 0$ – nije moguće istežanje radijalnih elemenata)

$f_{Rad,i}, f_{MRad,i} \dots\dots\dots$ - defleksija u i-tom radijalnom odn. međuradijalnom elementu, respektivno

$c_{Rad1}, c_{Rad2}, c_{MRad} \dots\dots\dots$ - empirijski koeficijenti

Pored navedenih parametara, u modelu figuriše i vertikalno opterećenje točka G_T , slika 57.



Slika 57. Dejstvo vertikalnog opterećenja G_T na model: $F_{Rad,i}$ – sila u i-tom radijalnom elementu; θ_i – ugao između vertikalne ose i napadne linije sile $F_{Rad,i}$; z – koordinata koja definiše položaj sistema u odnosu na vertikalnu osu

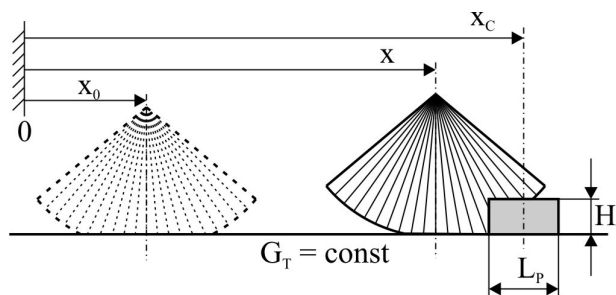
Vertikalno opterećenje pritiska segment uz podlogu, izazivajući time defleksije pojedinih radijalnih elemenata odnosno nastanak radijalnih sila. Od interesa je položaj statičke ravnoteže u vertikalnom pravcu, čiji uslov glasi:

$$G_T = \Sigma F_{Rad,i} \cdot \cos\theta_i \dots\dots\dots (51.)$$

Suma u izrazu (51) odnosi se na sve elemente čija je defleksija veća od nule, odnosno koji su se deformisali pod dejstvom opterećenja G_T . Pri tome se položaj sistema menja zbog odziva radijalnih i međuradijalnih elemenata shodno relacijama iz izraza (50). Kako elementi pri saopštavanju defleksije, odnosno pri povećavanju vertikalnog opterećenja, sukcesivno stupaju u kontakt sa podlogom, to nije moguće sistem jednačina sačinjen od relacija (50) i (51) rešiti analitičkim putem jer unapred nije poznat broj elemenata koji su pri ostvarenoj statičkoj ravnoteži u kontaktu sa podlogom. Stoga je neophodno korišćenje

iterativnog pristupa za iznalaženje približnog položaja ravnoteže. Iterativni postupak rešavanja podrazumeva zadavanje početne pretpostavljene vrednosti položaja z (slika 57).

Simulacija se sprovodi za kotrljanje točka preko jedne singularne prepreke pravougaonog mikroprofila. Parametri koji se zadaju su dužina prepreke L_p , njena visina H_p i položaj njene vertikalne ose simetrije u odnosu na koordinatni početak, x_c . Simulacija započinje saopštavanjem početnog uzdužnog položaja segmenta x_0 u odnosu na podlogu. Tokom kretanja uzdužni položaj sistema x se inkrementalno povećava za neki zadati korak uzdužnog pomeranja. Navedeni geometrijski parametri prikazani su na slici 58.



Slika 58. Parametri položaja sistema: 0 – koordinatni početak; x_0 – početni uzdužni položaj sistema; x – proizvoljni uzdužni položaj sistema tokom simulacije; x_c – položaj vertikalne ose simetrije prepreke; L_p , H_p – dužina i visina prepreke respektivno

Za svaki pojedinačni uzdužni položaj kroz koji sistem prolazi tokom simulacije sprovodi se iterativno izračunavanje položaja statičke ravnoteže. Iterativni postupak započinje od zadate početne vrednosti koordinate z i tekuće vrednosti uzdužnog položaja x. Za ove vrednosti x i z iz geometrijskih uslova izračunavaju se i memorišu defleksije pojedinih radijalnih elemenata, iz kojih slede veličine radijalnih sila. Sumirajući vertikalne komponente pojedinih sila (slično relaciji 51) izračunava se ukupna reakcija podloge za dati položaj sistema:

$$F_{Z,\text{sum}} = \sum F_{\text{Rad},i} \cdot \cos\theta_i \dots \dots \dots (52.)$$

Ukoliko se dobije da je odstupanje između izračunate i zadate vrednosti reakcije podloge (koja, zbog statičke ravnoteže, mora biti jednaka G_T) veće od neke unapred zadate dozvoljene tolerancije ϵ , tada se izračunava nova vrednost koordinate z prema relaciji zasnovanoj na metodu sečice za iterativno rešavanje nelinearnih jednačina [65]:

$$|G_T - F_{Z,\text{sum}}| > \epsilon \Rightarrow$$

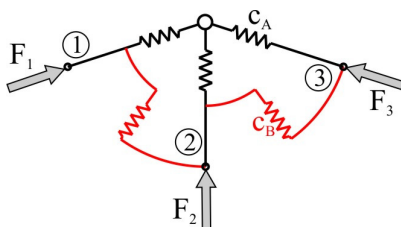
$$z_{(j+1)} = z_{(j)} - \frac{(F_{Z,\text{sum}(j)} - G_T) \cdot (z_{(j)} - z_{(j-1)})}{F_{Z,\text{sum}(j)} - F_{Z,\text{sum}(j-1)}} \dots \dots \dots (53.)$$

j- redni broj koraka iteracije

Praktična upotreba modela je pokazala da proces obično ili konvergira u relativno malom broju koraka, ili ne konvergira uopšte. Stoga, ukoliko se u okviru zadatog broja koraka postigne rešenje zadovoljavajuće tačnosti, rezultati se memorišu i proces se ponavlja za sledeći uzdužni položaj sistema. Ukoliko se u okviru zadatog broja koraka ne dostigne rešenje zadate tačnosti, prelazi se na sledeći uzdužni položaj bez memorisanja rezultata. Izračunata vrednost položaja statičke ravnoteže koristi se kao početna pretpostavljena vrednost u sledećem uzdužnom položaju.

Takođe se pokazalo da je iterativni postupak veoma osetljiv na početnu pretpostavljenu vrednost, odnosno za uspešno rešavanje iterativnog procesa neophodno je da početna pretpostavljena vrednost bude veoma bliska stvarnoj. Za potrebe pronalaženja odgovarajuće početne vrednosti korišćen je poseban program koji, varirajući vertikalni položaj sistema pri konstantnom uzdužnom položaju, izračunava vertikalnu reakciju podloge prema relaciji (52). Na taj način se dobija kriva rezultujuće vertikalne reakcije u funkciji ukupne defleksije sistema, odnosno pokazatelj ekvivalentne krutosti. Iz ove krive moguće je interpolacijom sa zadovoljavajućom preciznošću odrediti ravnotežni položaj sistema za slučaj $F_{Z, \text{sum}} = G_T$. Pri tome je usvojena pretpostavka da kretanje započinje na glatkoj podlozi, odnosno u početnoj poziciji sistem nema kontakt sa preprekom.

Zbog uticaja međuradijalnih elemenata, i sam proces izračunavanja radijalnih defleksija odnosno sila je iterativnog karaktera. Interakcija radijalnih i međuradijalnih elemenata objašnjena je na osnovu tročlanog sistema prikazanog na slici 59. Zbog pojednostavljenja, usvojeno je da se i radijalne i međuradijalne opruge ponašaju linearno.



Slika 59. Sistem sa tri radijalne opruge: c_A – krutost radijalnih opruga, c_B – krutost međuradijalnih opruga, F_1 , F_2 , F_3 – sile u radijalnim oprugama 1, 2, i 3 respektivno

S obzirom na linearnost svih opruga u sistemu na slici 59, važe sledeće relacije:

$$F_1 = c_A \cdot f_1 + c_B \cdot (f_1 - f_2) \dots \dots \dots (54.a)$$

$$F_2 = c_A \cdot f_2 + c_B \cdot (2 \cdot f_2 - f_1 - f_3) \dots \dots \dots (54.b)$$

$$F_3 = c_A \cdot f_3 + c_B \cdot (f_3 - f_2) \dots \dots \dots (54.c)$$

f_1 , f_2 , f_3 - defleksije radijalnih elemenata 1, 2 i 3 respektivno.

Relacija (54) može se uopštiti za sistem sa proizvoljnim brojem elemenata. Pri tome izrazi (54.a) i (54.c) važe za početni odnosno krajnji segment, dok se za unutrašnje segmente koristi izraz (54.b).

U prvom koraku se, za pretpostavljeni zadati (u opštem slučaju neravnotežni) položaj sistema, izračunavaju defleksije svih pojedinačnih radijalnih elemenata. Tom prilikom se još uvek ne uzimaju u obzir mehaničke karakteristike elemenata niti dejstvo međuradijalnih opruga. Identifikuju se i memorišu elementi koji u tim okolnostima nemaju kontakt sa podlogom (pasivni elementi, $F_i = 0$). Potom se za ove elemente na osnovu relacija (54) formira sistem jednačina iz kojih se izračunavaju ugibi pasivnih elemenata uzimajući u obzir dejstvo međuradijalnih opruga. Potom se proverava ima li aktivnih elemenata (elementi za koje je prethodno utvrđeno da imaju kontakt sa podlogom odnosno defleksiju veću od nule) u kojima je, takođe prema relacijama (54), dobijena negativna vrednost radijalne sile. Ovakav rezultat ukazuje na to da defleksija posmatranog elementa usled dejstva međuradijalnih elemenata prevazilazi onu nastalu usled kontakta sa podlogom. Takvi elementi se proglašavaju pasivnim i uvrštavaju u sistem (54) koji se ponovo rešava sa ugibima kao nepoznatim veličinama. Ovaj postupak se ponavlja sve dok se pojavljuju aktivni elementi sa negativnim silama.

S obzirom na to da su, za razliku od pristupa korišćenog za formiranje sistema (54) u kom su usvojene linearne radijalne opruge, u modelu korišćene nelinearne opruge opisane relacijom (50.a), potreban je još jedan dodatni iterativni ciklus za određivanje približnih vrednosti ugiba. Pri tome se u okviru modela zadaje željena tačnost izračunavanja.

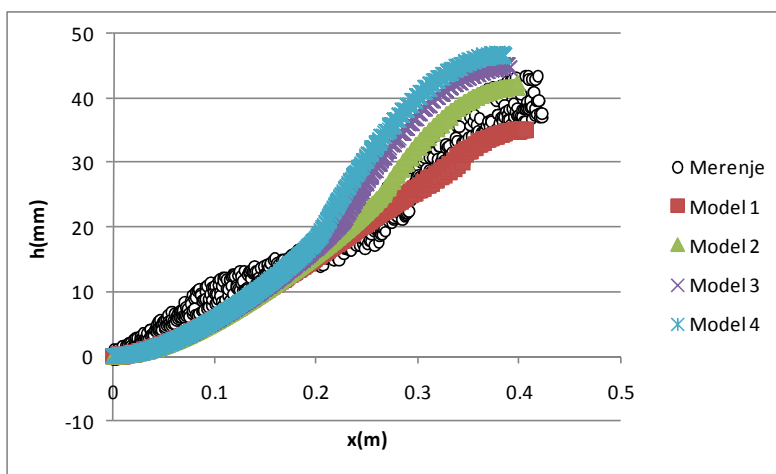
Na osnovu gornjih razmatranja, aplikacija modela izvršena je keiranjem odgovarajućeg programskog koda u programskom jeziku Matlab datog na priloženom CD-ROM-u.

7.7.3 PARAMETRIZACIJA MODELA

Da bi rezultati simulacije bili validni, potrebno je utvrditi odgovarajuće vrednosti parametara navedenih u prethodnoj tački. Vrednosti geometrijskih parametara R_0 (slobodni radijus pneumatika) i ϕ (ugaona širina zahvata segmenta) određene su na osnovu spoljnih uslova kako je navedeno ($R_0 = 625$ mm, $\phi \geq 100^\circ$, $G_T = 9600$ N). U okviru postupka parametrizacije potrebno je odrediti vrednosti parametara:

- N - broj radijalnih elemenata
- C_{Rad1} , C_{Rad2} , C_{MRad} - parametri koji opisuju ponašanje radijalnih i međuradijalnih opruga (relacije 50)

Postupak parametrizacije sproveden je korišćenjem posebnog programa putem kog je pozivana Matlab funkcija za izvršenje simulacije, pri čemu su kao parametri funkcije uvršteni parametri modela čiju je vrednost potrebno odrediti. Ostale veličine potrebne za definisanje modela zadate su u okviru same funkcije (R_0 , ϕ , položaj prepreke, početni položaj sistema itd). U okviru ovog programa vršena je varijacija vrednosti navedenih nepoznatih parametara. Nakon toga je vršeno upoređivanje rezultata simulacije sa rezultatima merenja. U prvim koracima nepoznati parametri su birani u relativno širokim granicama, na proizvoljan način uz procene na bazi iskustva. Na osnovu uvida u to koje vrednosti parametara donose najveći stepen slaganja rezultata simulacije i rezultata merenja, postupno su sužavani intervali njihovih varijacija. Primer poredjenja rezultata merenja sa rezultatima simulacije za 4 različite kombinacije parametara N , C_{Rad1} , C_{Rad2} i C_{MRad} prikazan je na dijagramu na slici 60.



Slika 60. Poređenje rezultata merenja i rezultata simulacije za 4 kombinacije parametara N , c_{Rad1} , c_{Rad2} i c_{MRad} : h (mm) – visina efektivnog mikroprofila, x (m) – uzdužni položaj pneumatika; rezultati važe za prepreku sa $L_P = 200$ mm i $H_P = 50$ mm

Sukcesivnim sprovođenjem ovog postupka određene su njihove vrednosti za koje je stepen slaganja ocenjen kao zadovoljavajući. Ove vrednosti iznose:

- $N=360$
- $c_{Rad1}=6$ [N/mm]
- $c_{Rad2}=-0.002 \cdot c_{Rad1}$
- $c_{MRad}=c_{Rad1}/10$

7.7.4 VARIJACIJE VERTIKALNIH OPTEREĆENJA KOJE ODGOVARAJU ZADATIM VARIJACIJAMA KONTAKTNE DUŽINE

Parametrizacija modela prema prethodnoj tački izvršena je uzimajući u obzir rezultate merenja dobijene kada je dužina kontaktne površine iznosila:

$$l_{KONT} = l_{KONT2} = 330 \text{ mm}$$

U funkciji potpune validacije modela, upoređivanje sa rezultatima merenja potrebno je izvršiti i za preostale dve vrednosti kontaktne dužine:

$$l_{KONT1} = 380 \text{ mm, i}$$

$$l_{KONT3} = 280 \text{ mm.}$$

Pri izvođenju eksperimenta, promena kontaktne dužine vršena je podešavanjem pritiska u pneumatiku. U slučaju modela sa radijalnim i međuradijalnim oprugama, ovakav pristup bi značio promenu vrednosti parametara utvrđenih u prethodnoj tački. Zbog toga je varijacija kontaktne dužine u okviru simulacije sprovedena putem promene vertikalnog opterećenja, sa kriterijumom da nova vrednost vertikalnog opterećenja odgovara zadatim vrednostima

kontaktne dužine, odnosno da dobijena forma kvazistatičke envelope iskazuje svojstva što približnija onima dobijenim eksperimentalnim merenjima u datim uslovima.

Pri određivanju nove vrednosti G_T koja pri pritisku iz prethodne etape daje željenu vrednost kontaktne dužine l_{KONT} , pošlo se od empirijske relacije (19) utvrđene u tački 6.6.2:

$$l_{KONT} = c_1 \cdot \frac{G_T}{p^{c_{p1}}} + c_2 \cdot \frac{\sqrt{G_T}}{p^{c_{p2}}} \dots\dots\dots(19.)$$

l_{KONT} [mm], G_T [daN], p [bar]

c_1, c_2, c_{p1}, c_{p2} – regresioni koeficijenti

Kontaktnoj dužini iz prethodne etape ($l_{KONT} = 330$ mm) i osnovnom vertikalnom opterećenju ($G_T = 960$ daN), prema relaciji (19), odgovara vrednost pritiska:

$$p = 1.42 \text{ bar}$$

Navedena vrednost je utvrđena numeričkim rešavanjem jednačine (19) sa pritiskom kao nepoznatom veličinom, za šta je korišćena funkcija "Goal Seek" u okviru računarskog progama MS Excel. Ova vrednost pritiska, kojoj odgovaraju utvrđene vrednosti parametara modela, korišćena je dalje kao ulazna veličina za određivanje ekvivalentnih vrednosti vertikalnog opterećenja:

$$l_{KONT} = 280 \text{ mm}, p = 1.42 \text{ bar} \Rightarrow G_T = 644.2 \text{ daN}$$

$$l_{KONT} = 380 \text{ mm}, p = 1.42 \text{ bar} \Rightarrow G_T = 1379.26 \text{ daN}$$

Zbog određenih odstupanja koje modeli i empirijske relacije korišćene u izračunavanjima neminovno ispoljavaju, dobijene vrednosti vertikalnog opterećenja po potrebi treba korigovati tako da se postigne što potpunije slaganje rezultata merenja sa rezultatima simulacije. U predmetnom istraživanju ova vrsta korekcije nije bila neophodna. Veza između dobijenih vrednosti za veličine G_T i l_{KONT} je, na osnovu rezultata ispitivanja statičkih deformacija pneumatika (tačka 6.6.1, dijagram na slici 32) proverena i preko ugiba:

- Pri $G_T=644.2$ daN ugib iznosi $f \sim 26$ mm, što odgovara kontaktnoj dužini ~ 289 mm što je vrlo blisko pretpostavci (odstupanje oko 3%).
- Pri $G_T=1379.26$ daN ugib iznosi $f \sim 45$ mm, što odgovara kontaktnoj dužini $\sim 375 \div 380$ mm što se u visokom stepenu slaže sa pretpostavkom.

7.7.5 VALIDACIJA KVAZISTATIČKOG MODELA PNEUMATIKA SA RADIJALNIM I MEDURADIJALNIM OPRUGAMA

Validacija modela je izvršena upoređivanjem rezultata simulacije sa rezultatima merenja. Upoređivanje rezultata izvršeno je po dva kriterijuma:

1. vizuelno poređenje saglasnosti kvalitativnog toka modelirane kvazistatičke envelope sa osrednjenim rezultatima merenja
2. izračunavanje odstupanja između predviđanja modela i osrednjenih rezultata merenja u 20 tačaka.

Odstupanja između predviđanja modela i osrednjenih rezultata merenja su data kao:

- a) apsolutna odstupanja, i
- b) relativna odstupanja u procentualnom iznosu, u odnosu na maksimalnu visinu efektivnog mikroprofila za posmatrani slučaj utvrđenu merenjima.

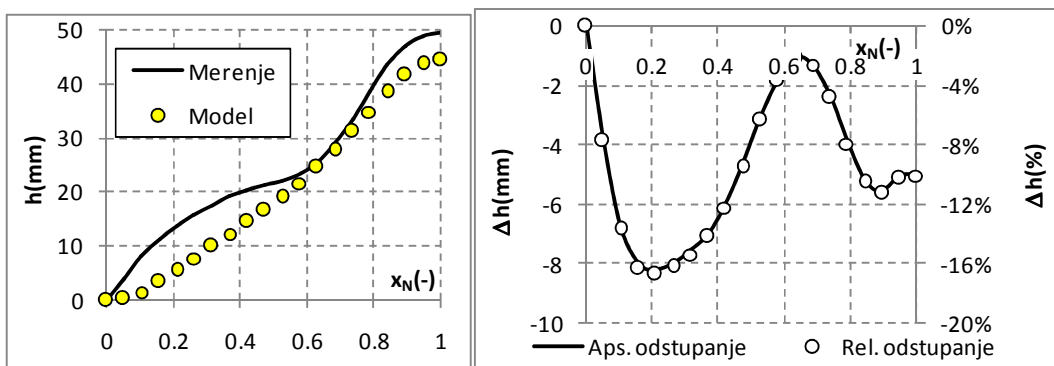
Na slikama 61, 62, 63 i 64 prikazani su reprezentativni primeri upoređivanja predviđanja modela sa rezultatima simulacije. Uzdužna koordinata kvazistatičke envelope na prikazanim dijagramima data je u normiranom obliku u odnosu na ukupnu dužinu envelope za svaki posmatrani slučaj:

$$x_N = x / x_{MAX} \dots\dots\dots(55.)$$

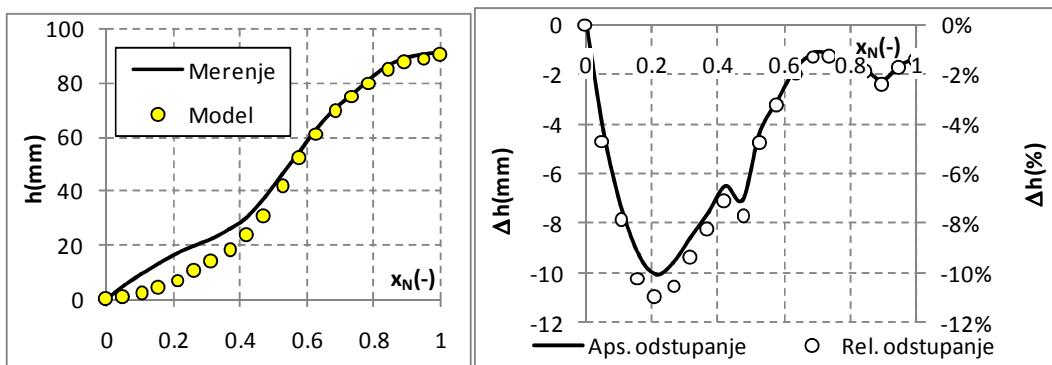
x [m].....- tekuća uzdužna koordinata kvazistatičke envelope

x_N [-].....- normirani relativni položaj točka u odnosu na prepreku

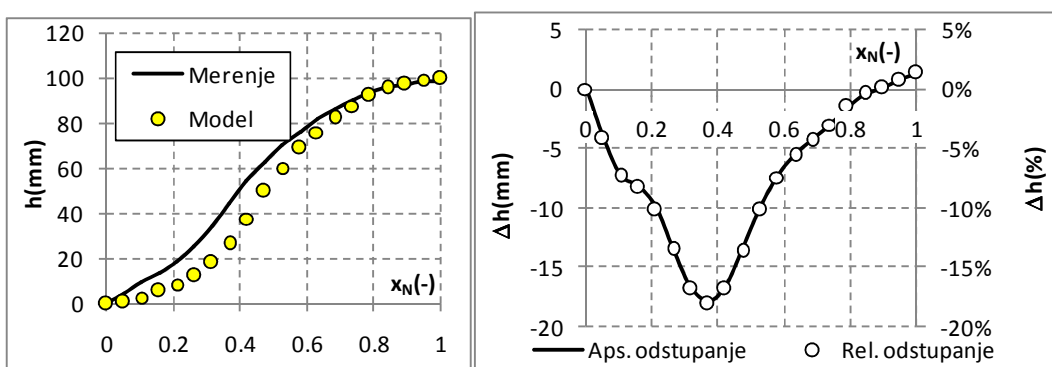
x_{MAX} [m]...- ukupna dužina predmetne kvazistatičke envelope



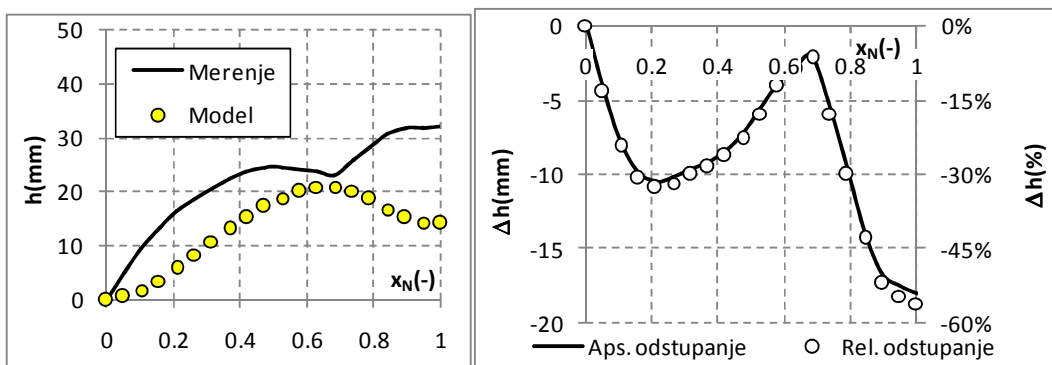
Slika 61. Upoređivanje predviđanja modela sa rezultatima merenja za slučaj kontaktne dužine $l_{KONTI} = 380mm$, prepreka $L_P \times H_P = 300 \times 50mm$



Slika 62. Upoređivanje predviđanja modela sa rezultatima merenja za slučaj kontaktne dužine $l_{KONT2} = 330\text{mm}$, prepreka $L_P \times H_P = 200 \times 100\text{mm}$



Slika 63. Upoređivanje predviđanja modela sa rezultatima merenja za slučaj kontaktne dužine $l_{KONT3} = 280\text{mm}$, prepreka $L_P \times H_P = 300 \times 100\text{mm}$



Slika 64. Upoređivanje predviđanja modela sa rezultatima merenja za slučaj kontaktne dužine $l_{KONT1} = 380\text{mm}$, prepreka $L_P \times H_P = 100 \times 100\text{mm}$

Prikazani rezultati pokazuju da se značajnija odstupanja pojavljuju pretežno u početnom delu hoda preko prepreke, odnosno u zoni manjih amplituda. Sa porastom uzdužne koordinate – a samim tim i amplitude ordinate efektivnog mikroprofila – odstupanja se u većini slučajeva smanjuju. Opravdano je pretpostaviti da odstupanja u zoni malih

amplituda nemaju značajan uticaj na frekventni sadržaj pobude, pa se na osnovu toga može zaključiti da model sa zadovoljavajućim stepenom slaganja opisuje stvarni sistem. Izuzetak predstavljaju slučajevi kod kojih je dužina prepreke L_P znatno manja od dužine kontaktne površine. U takvim slučajevima stepen tačnosti predviđanja modela značajno opada. Karakterističan primer predstavlja dijagram na slici 64.

7.7.6 SPROVOĐENJE VIRTUELNIH EKSPERIMENATA ZA PRIKUPLJANJE DODATNIH SETOVA EMPIRIJSKIH PODATAKA

Razvoj virtuelnog modela kvazistatičke envelope zasnovan na aproksimaciji fizičke strukture pneumatika prikazan u prethodnim tačkama omogućava prevazilaženje ograničenja postojećih pri sprovođenju fizičkog eksperimenta. Ovim putem je omogućeno ne samo značajno olakšano i pojednostavljeno sprovođenje velikog broja eksperimenata pri raznovrsnim kombinacijama uticajnih parametara, već se i sami parametri mogu varirati u znatno širim granicama i sa mnogo finijom rezolucijom. Od ovakvog seta empirijskih podataka može se očekivati pružanje kvalitetnijih i potpunijih informacija o ponašanju sistema, što treba da podigne kvalitet empirijskog modela formiranog na osnovu tog seta.

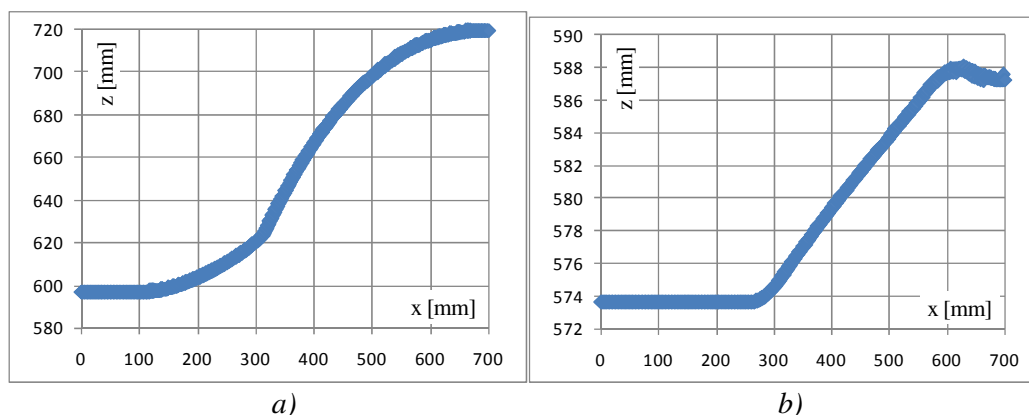
Shodno razmatranjima iz tačke 7.7.4, kao pokazatelj radnog režima pneumatika koristi se vertikalno opterećenje G_T , umesto kontaktne dužine l_{KONT} korišćene u tu svrhu pri izvođenju fizičkog eksperimenta.

Kombinujući rezultate sprovedenih eksperimentalnih istraživanja, podatke o karakteristikama ispitivanog pneumatika i iskustvenu procenu, određeni su dijapazoni u kojima se variraju vrednosti parametara koji definišu uslove eksperimenta:

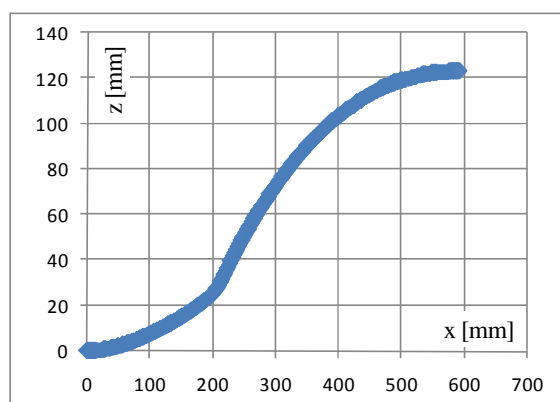
- radni režim pneumatika: $G_T = 0 \div 20.000 \text{ N}$
- dužina prepreke: $L_P = 50 \div 400 \text{ mm}$
- visina prepreke: $H_P = 20 \div 150 \text{ mm}$

Korišćenjem komande za generisanje slučajnih brojeva sa uniformnom raspodelom, pomoću programa Matlab generisano je 100 slučajnih kombinacija parametara G_T , L_P i H_P čije vrednosti leže unutar gore navedenih intervala. Sve kombinacije prikazane su u tabeli 15. U funkciji naknadne obrade i korišćenja dobijenih rezultata, setovi podataka označeni su brojevima redom od 1 do 100. Na slici 65 su, radi ilustracije, prikazani rezultati simulacije za dva karakteristična slučaja.

Kao i u slučaju rezultata fizičkog eksperimenta, izvorni rezultati simulacije su obrađeni svođenjem početne vrednosti z koordinate na nulu i odbacivanjem vrednosti dobijenih pre uspostavljanja kontakta između točka i podloge. Primer rezultata dobijenih obradom izvornih podataka prikazanih na slici 65a prikazan je na slici 66.



Slika 65. Rezultati simulacije za model pneumatika sa međuradijalnim oprugama:
 a) $G_T=8436\text{ N}$, $L_P \times H_P=371 \times 123\text{ mm}$; b) $G_T=19190\text{ N}$, $L_P \times H_P=280 \times 25\text{ mm}$



Slika 66. Rezultati simulacije sa sl. 65a nakon obrade

Tabela 15. Oznake setova podataka dobijenih simulacijom kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke sa pravougaonim poprečnim presekom pomoću međuradijalnog modela, i odgovarajuće vrednosti parametara (G_T – vertikalno opterećenje točka, L_P , H_P – dužina i visina poprečnog preseka prepreke)

No.	$G_T(\text{N})$	$L_P(\text{mm})$	$H_P(\text{mm})$	No.	$G_T(\text{N})$	$L_P(\text{mm})$	$H_P(\text{mm})$	No.	$G_T(\text{N})$	$L_P(\text{mm})$	$H_P(\text{mm})$
1	8436	371	123	35	1564	205	34	68	3415	130	77
2	19190	280	25	36	19238	52	121	69	6223	374	76
3	16983	377	109	37	16347	355	31	70	3400	360	148
4	15155	311	71	38	7996	141	125	71	8778	89	54
5	13110	110	112	39	8629	369	44	72	8175	259	55
6	637	147	27	40	5277	101	38	73	12057	299	49
7	1943	339	111	41	17386	253	92	74	2349	154	62
8	6342	384	28	42	2900	349	101	75	8484	228	32
9	8775	184	120	43	7020	230	73	76	5250	331	24

No.	Gt(N)	Lp (mm)	Hp (mm)	No.	Gt(N)	Lp (mm)	Hp (mm)	No.	Gt(N)	Lp (mm)	Hp (mm)
10	15904	116	84	44	1520	134	37	77	18578	306	84
11	8912	277	113	45	3679	134	75	78	11571	134	80
12	15094	147	109	46	994	366	143	79	19262	242	88
13	13102	107	36	47	9818	222	64	80	4632	222	102
14	9968	386	65	48	18002	180	35	81	13583	189	68
15	11706	129	118	49	15606	187	52	82	19760	64	136
16	5102	228	111	50	8079	84	38	83	18266	329	33
17	17700	378	92	51	18842	385	95	84	5238	168	109
18	2773	103	54	52	1196	133	66	85	2732	303	34
19	16815	139	126	53	16424	56	26	86	13200	224	122
20	4871	376	66	54	3380	278	116	87	14301	367	136
21	3932	138	101	55	12955	208	92	88	6684	295	46
22	9400	174	130	56	5927	311	45	89	611	311	86
23	11706	243	140	57	13736	115	68	90	9599	367	100
24	5717	316	118	58	12513	324	31	91	12354	351	125
25	7609	249	30	59	18588	322	84	92	11535	115	52
26	1080	236	122	60	8718	207	60	93	17731	61	84
27	18681	96	94	61	10171	229	127	94	3359	393	113
28	9388	55	64	62	15897	276	70	95	10010	215	28
29	3244	328	61	63	16232	237	66	96	13640	65	30
30	10571	108	99	64	18400	340	92	97	10433	84	127
31	5660	260	106	65	12450	256	48	98	16351	303	40
32	14964	208	31	66	6025	215	50	99	13193	232	147
33	4580	370	40	67	16887	119	50	100	12980	331	79
34	16517	239	150								

8. RAZVOJ I APLIKACIJA MODELA

8.1 Definisane strukture modela

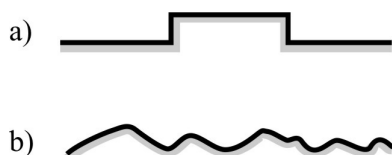
8.1.1 MODEL ENVELOPE KRETANJA

Zadatak modela kvazistatičke envelope je predviđanje efektivnog mikroprofila u funkciji geometrije stvarnog profila podloge, uz interakciju odnosno međusobnu razmenu informacija sa modelom elastične strukture pneumatika. Za jednu određenu geometriju mikroprofila podloge, forma kvazistatičke envelope menja se sa promenom eksploatacionih parametara pneumatika odnosno vertikalnog opterećenja i pritiska. Kako je pokazano u tački 7.3, umesto korišćenja ova dva parametra moguće je sa zadovoljavajućom tačnošću koristiti dužinu kontaktne površine kao jedinstveni pokazatelj radnog režima. Alternativno, jednoznačna relacija između kontaktne dužine i defleksije pneumatika (tačka 6.6.2, dijagram na sl. 33), omogućava da se u tu svrhu koristi i veličina vertikalne defleksije odnosno ugiba pneumatika. Međutim, kako je dijapazon fluktuacija ugiba u realnim eksploatacionim uslovima relativno uzak u odnosu na njegove apsolutne vrednosti, opravdano je pretpostaviti da bi model u takvom slučaju ispoljavao znatno veću osetljivost na eventualna odstupanja proračunskog ugiba od stvarnih vrednosti. Zbog toga ugib u okviru ovog istraživanja nije korišćen u pomenutu svrhu, niti je u dostupnoj literaturi u bilo kojoj od publikacija pominjan takav pristup. Navedenim razmatranjima su ujedno definisani ulazni i izlazni parametri modela:

-
- ULAZNI PARAMETRI:
 - geometrija profila podloge
 - položaj točka u odnosu na podlogu
 - pokazatelj(i) radnog režima pneumatika (kontaktna dužina / opterećenje i pritisak)
-
- IZLAZNI PARAMETAR: - visina efektivnog mikroprofila podloge
-

Pri definisanju strukture modela envelope kretanja, primarni zadatak je da se konkretizuje pojam geometrije profila podloge, odnosno da se definiše odgovarajući način da se ovaj parametar saopšti modelu u formi numeričkih vrednosti. U tom smislu treba razlikovati dva osnovna slučaja, slika 67:

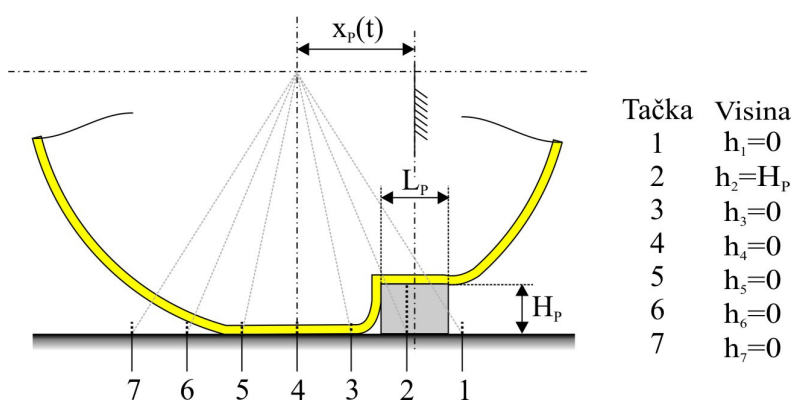
- diskretno promenljiva geometrija podloge ("stepenik", "greda" i sl.)
- kontinualno promenljiva geometrija podloge (uobičajena realna neravna podloga)



Slika 67. Osnovni karakteristični slučajevi geometrije profila podloge: a) diskretno promenljiva, b) kontinualno promenljiva

8.1.2 DISKRETNO PROMENLJIVA GEOMETRIJA PROFILA PODLOGE KAO ULAZNI PARAMETAR MODELA ENVELOPE

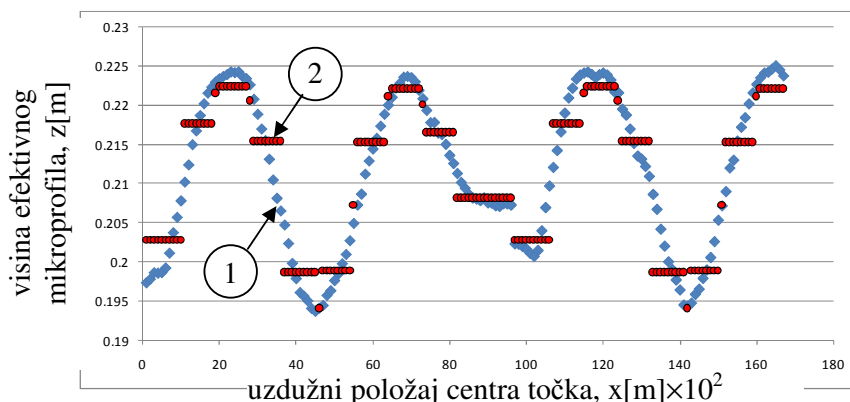
Jedna od osnovnih ideja za realizaciju numeričke reprezentacije geometrije mikroprofila podloge je njena diskretizacija u smislu navođenja određenog broja vrednosti visine ordinate mikroprofila u različitim tačkama. Jedna mogućnost je da se izabere skup tačaka sa fiksnim pozicijama u odnosu na centar pneumatika i da se geometrija podloge predstavi vrednostima visine ordinate mikroprofila u ovim tačkama. Ovakav princip šematski je prikazan na slici 68, na kojoj je dat primer ravanskog modela kotrljanja pneumatika sa 7 tačaka (obeležениh brojevima od 1 do 7) čije je uzdužno rastojanje od vertikalne ose točka nepromenljivo tokom kretanja točka.



Slika 68. Pneumatik pri prelasku preko singularne neravnine pravougaonog poprečnog preseka: $x_p(t)$ – tekuća vrednost uzdužnog rastojanja centra točka od ose simetrije prepreke; L_p , H_p – geometrijski parametri neravnine; 1 ÷ 7 - tačke podloge čije je uzdužno rastojanje od vertikalne ose točka nepromenljivo tokom kretanja točka; h_i – visina ordinate mikroprofila podloge u i -toj tački

Navedeni pristup, međutim, nije prikladan za slučaj diskretno promenljive geometrije koju karakteriše nagla, skokovita promena visine profila. Na mestu promene, uzdužnoj koordinati odgovaraju dve vrednosti visine ordinate mikroprofila, pošto ista na tom mestu skokovito menja vrednost. Osnovni problem koji se pri tome javlja je to što, pri kretanju pneumatika u uzdužnom pravcu, tokom određene konačne dužine hoda, model neće registrovati promene u položaju točka u odnosu na neravninu. Uticaj neravnine na visinu efektivnog mikroprofila u funkciji uzdužnog pomeranja točka je, međutim, kontinualne prirode. Stoga bi, da bi forma krive efektivnog mikroprofila mogla biti modelirana sa zadovoljavajućom tačnošću, broj tačaka za koji bi modelu trebalo saopštiti visinu stvarnog

profila podloge morao biti neprihvatljivo velik. U suprotnom, model bi iskazivao formu kvazistatičke envelope kao na slici 69. Na dijagramu je prikazano poređenje izmerenog (kriva 1) i modeliranog efektivnog mikroprofila (kriva 2). Treba istaći da postignuti nezadovoljavajući rezultati, koji su ovde prikazani u ilustrativnu svrhu, nisu posledica neadekvatne unutrašnje strukture modela već neodgovarajućeg načina zadavanja ulaznih podataka.



Slika 69. Rezultat empirijskog modeliranja kvazistatičke envelope sa geometrijom profila podloge predstavljenom preko niza tačaka sa stalnim položajem u odnosu na vertikalnu osu točka, 1 – izmereni efektivni mikroprofil, 2 – rezultat simulacije pri neadekvatnom načinu zadavanja ulaznih podataka

S obzirom na izneto, potrebno je definisati drugačiji način definisanja geometrije podloge. Ako se posmatranje ograniči na singularnu prepreku pravougaonog poprečnog preseka (što će biti slučaj u daljem radu), kao pogodan izbor može se smatrati korišćenje sledećih parametara (slika 68):

- relativni položaj točka u odnosu na neravninu - x_p ;
- geometrijski parametri neravnine:
 - visina H_p , i
 - dužina L_p .

U odnosu na prethodno posmatrani slučaj, ovaj pristup dovodi do značajnog pojednostavljenja u smislu kriterijuma za izbor i ukupnog broja ulaznih parametara. Njegova dodatna prednost je isključivanje iz razmatranja onih tačaka podloge sa kojima pneumatik nije u kontaktu. Ispunjenost ovog uslova za opšti slučaj je kod pristupa sa fiksnim tačkama znatno teže obezbediti.

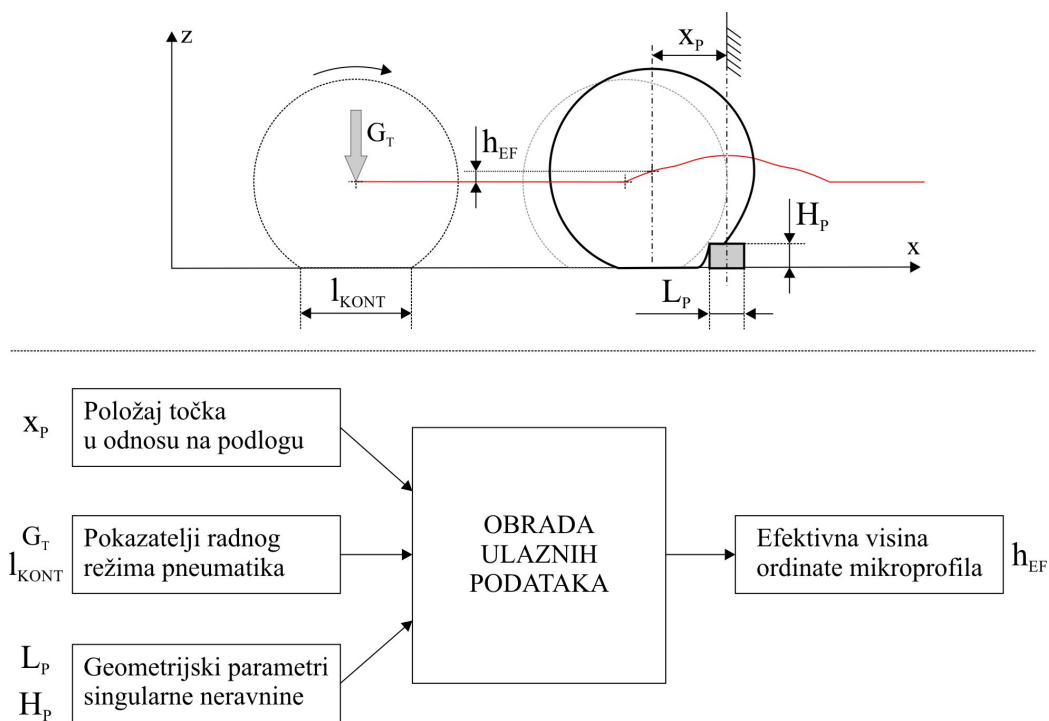
Način saopštavanja ulaznih parametara modelu nije jednoznačno određen. Sa stanovišta pripreme podataka za obuku neuronske mreže, najjednostavnije je parametre zadati direktno, u eksplicitnoj formi. Alternativno, moguće je osmisliti veličine izvedene na bazi osnovnih veličina x_p , H_p i L_p . Za definisanje takvih izvedenih veličina ne postoje posebni jasno definisani kriterijumi. Potrebno je eksperimentalnim putem, u okviru postupka obuke neuronske mreže, odrediti da li ovakav način saopštavanja ulaznih parametara modelu daje, ili ne, bolje performanse modela u odnosu na njihovo eksplicitno zadavanje.

Napominje se da pristup sa zadavanjem geometrijskih parametara neravnine važi samo za singularnu neravninu pravougaonog poprečnog preseka. Ovaj profil ima praktičnu primenu jer se u svrhu standardizacije kao i zbog jednostavnosti primene u realnim i virtuelnim

ispitivanjima često koristi za produkciju ispitnih podloga, pa je stoga opravdano da bude obuhvaćen funkcionalnošću modela. Primena postupka za slučaj složenijeg poprečnog preseka podloge je takođe moguća i principijelno ista kao i u opisanom slučaju, ali zahteva da se geometrijski parametri preseka fiksiraju, odnosno da se model za svaki pojedinačni oblik preseka zasebno generiše. Ovakav izbor profila podloge, sa druge strane, ne bi imao praktičnu vrednost, jer se njegovom primenom ne bi dobile nikakve dodatne informacije u odnosu na proučavanje kotrljanja točka preko singularne neravnine pravougaonog poprečnog preseka. Što se, međutim, tiče pravougaone neravnine pod kosim uglom u odnosu na pravac kretanja, njena upotreba se može smatrati svrsishodnom jer, zbog asimetrične deformacije karkase i gazećeg sloja pneumatika, obuhvata nešto drugačiju formu ponašanja. Opravdano je pretpostaviti da bi primenjeni pristup za opis geometrije podloge mogao da se obuhvati proširivanjem ulaznih podataka nekim odgovarajućim načinom zadavanja ugla ose neravnine u odnosu na pravac kretanja. Konkretni koraci u tom pravcu, međutim, zbog obima potrebnog angažmana nisu bili uključeni u polje rada predmetnog istraživanja.

8.1.3 FORMA STRUKTURE MODELA

Na osnovu razmatranja u prethodnim tačkama, struktura modela može se grafički prikazati šemom na slici 70.



Slika 70. Struktura empirijskog modela envelope kretanja za singularnu neravninu sa pravougaonim poprečnim presekom

8.2 Izbor i osnovne karakteristike softvera za manipulaciju veštačkim neuronskim mrežama

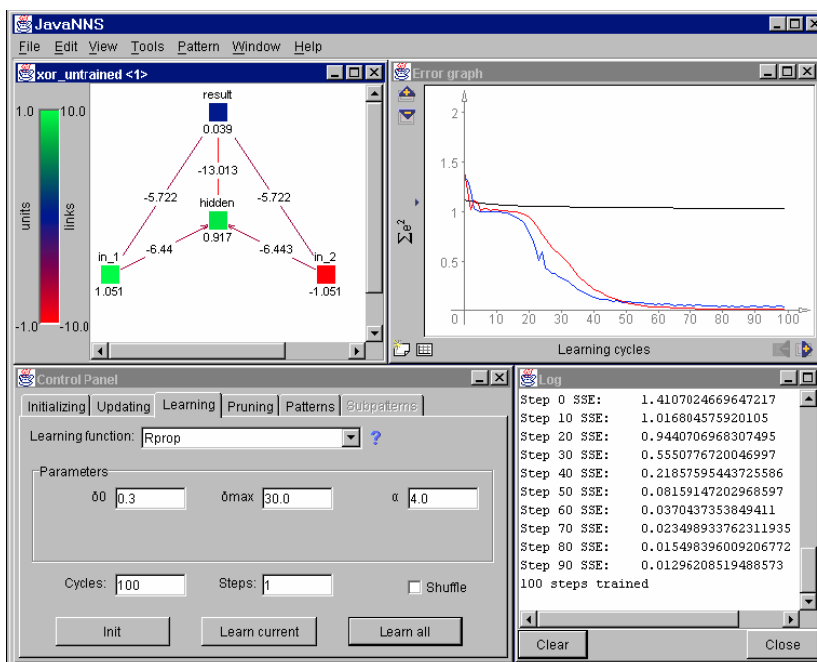
Koncept primene veštačkih neuronskih mreža zasnovan je na velikom broju računskih operacija, što pogotovo važi za fazu obuke. Stoga je u ovoj oblasti neizostavna primena računara odnosno odgovarajućih računarskih programa. S obzirom na to da postoji relativno velik broj raspoloživih softverskih rešenja za tu svrhu, u praksi je uobičajeno da se koristi neka od ovih aplikacija. Za upotrebu neuronskih mreža na korisničkom nivou razvoj sopstvene aplikacije nije svrsishodan.

U ovom radu korišćen je program JavaNNS, koji predstavlja verziju programa SNNS (Stuttgart Neural Network Simulator) bolje prilagođenu operativnom sistemu MS Windows. Kriterijumi na osnovu kojih je izabran ovaj program su sledeći:

- program se distribuira sa otvorenim pristupom;
- upotreba programa je zasnovana na grafičkom korisničkom interfejsu jednostavnom za učenje i upotrebu;
- za upotrebu programa dostupno je detaljno korisničko uputstvo upotpunjeno iscrpnim i jasno formulisanim teorijskim obrazloženjima;
- performanse programa, kako u pogledu mogućnosti kreiranja i manipulacije objektima rada (neuronske mreže, njihove komponente, parametri obuke, rezultati upotrebe itd.) tako i u pogledu brzine izvršavanja, su na nivou zadovoljavajućem u okviru datih uslova;
- u savremenoj literaturi [49], mogu se naći preporuke za upotrebu programa praćene primerima za kreiranje, obuku i optimizaciju neuronskih mreža, i za aplikaciju obučениh mreža;
- ranija pozitivna iskustva autora disertacije – u ranijem istraživačkom radu upotrebom programa SNNS uspešno je rešen problem empirijskog modeliranja dinamičkog ponašanja amortizera motornih vozila pomoću veštačke neuronske mreže [81] [82] [83] [84].

Na slici 71 [101] prikazan je izgled grafičkog korisničkog interfejsa programa JavaNNS sa nekoliko glavnih elemenata.

Kreiranje neuronskih mreža vrši se pomoću posebnog alata u okviru korisničkog interfejsa. Ovo obuhvata izbor topologije mreže u smislu broja neurona i njihovog rasporeda po slojevima, kao i definisanje sinaptičkih veza među neuronima. Postupak kreiranja mreže takođe obuhvata i definisanje osobina neurona kao što su izbor aktivacione funkcije, njenih parametara itd. Postupkom obuke neuronske mreže određuju se vrednosti sinaptičkih koeficijenata optimalne sa aspekta rešavanja datog problema, kako je objašnjeno u okviru teorijskih razmatranja u poglavlju 4. Memorisanjem konfiguracije vrednosti sinaptičkih koeficijenata obučene mreže ostaju na raspolaganju za fazu aplikacije mreže. Konfiguracija mreže se čuva u obliku tekstualne datoteke, što omogućava olakšan pristup vrednostima sinaptičkih koeficijenata i pragova neurona odnosno njihovo očitavanje radi aplikacije mreže izvan programa JavaNNS.



Slika 71. Grafički korisnički interfejs programa JavaNNS sa elementima: grafički prikaz neuronske mreže, kriva greške, upravljački panel i log panel [101]

Setovi podataka za obuku neuronskih mreža ili za generisanje rezultata upotrebe obučene mreže učitavaju se preko komandnog menija. Iako je kreiranje i editovanje setova podataka (tzv. obrazaca) omogućeno preko upravljačkog panela, za obimnije setove podataka mnogo je prikladnija upotreba eksternog tekst-editora ili namenski kreiranih programa za manipulaciju podacima.

Glavni alat koji se koristi za obuku neuronskih mreža je upravljački panel. U okviru ovog panela vrši se izbor funkcije učenja i njenih parametara, kao i broj ciklusa obuke. Takođe se biraju parametri inicijalizacije mreže, podaci za obuku i validaciju, itd. Tokom obuke moguće je u realnom vremenu pratiti tok dijagrama kumulativne greške setova podataka za obuku i validaciju, što se koristi kao ključni kriterijum za izbor optimalnog broja ciklusa obuke sa stanovišta sposobnosti mreže da generalizuje.

8.3 Aspekti pripreme podataka za obuku neuronskih mreža

Izvorni rezultati eksperimentalnih merenja, bez obzira na to da li se radi o fizičkom (tačka 7.6) ili virtuelnom (tačka 7.7) eksperimentu, sadrže podatke o apsolutnoj vrednosti z koordinate centra pneumatika (slika 70). Podaci u ovoj formi nisu prikladni za obuku neuronskih mreža, pa je potrebno sprovesti postupke njihove obrade u funkciji formiranja odgovarajućih datoteke koje će biti saopštavane neuronskim mrežama prilikom obuke kao setovi podataka za obuku i validaciju.

Početni koraci obrade podataka detaljnije su opisani u tački 7.2. U tom delu postupka vrši se svođenje referentne vrednosti z koordinate (početne vrednosti, pre kontakta točka sa preprekom) na nulti nivo, kako bi rezultat predstavljao visinu efektivnog mikroprofila h_{EF} .

Takođe se transformiše x koordinata tako da se njena nulta vrednost usvaja u položaju inicijalnog kontakta točka i podloge, pri čemu se odbacuju vrednosti snimljene pre početka kontakta. Takođe, zbog simetrije odziva, odbacuje se silazni deo krive odnosno podaci snimljeni nakon prelaska centra pneumatika iznad središta poprečnog preseka prepreke. Za sprovođenje ovih postupaka pogodna je upotreba nekog od programa za kalkulacije sa tabelarnim podacima.

S obzirom na to da se kao prenosna funkcija neurona koristi sigmoida (jednačina /4/, tačka 4.2.1) čija je vrednost uvek između 0 i 1, to sledi da će i vrednost izlaza izlaznog neurona, kojim se modelira visina efektivnog mikroprofila, morati da se nađe u ovom intervalu. Iz ovog razloga pribegava se normiranju vrednosti ovog parametra tako da normirane vrednosti predstavljaju sliku intervala stvarnih vrednosti preslikanog unutar intervala 0 i 1. Obično se sami krajevi ovog intervala izbegavaju, pa se za granice normiranja koristi nešto uži interval. Interval koji je ovde usvojen je [0.2, 0.8]. Za normiranje je potrebno još utvrditi granice u kojima se kreću vrednosti visine efektivnog mikroprofila dobijene eksperimentalnim ispitivanjima. Za minimalnu vrednost se unapred zna da iznosi 0, dok maksimalna vrednost svakako ne može biti veća od maksimalne visine prepreke korišćene pri eksperimentima. Kako je već ranije navedeno, maksimalna visina prepreke iznosi 150 mm, kako u fizičkim tako i u virtualnim eksperimentima. Takođe, iskustveno je ocenjeno da primena prepreka većih visina za date dimenije pneumatika nije svrsishodna. Stoga se navedena vrednost (150 mm) može usvojiti kao gornja granica intervala stvarnih vrednosti visine efektivnog mikroprofila. Normiranje se vrši prema izrazu:

$$h_N = \frac{h_{NMAX} - h_{NMIN}}{h_{MAX} - h_{MIN}} \cdot (h - h_{MIN}) + h_{NMIN} \dots \dots \dots (56.)$$

$h_{MIN} = 0 \dots \dots \dots$ - minimalna visina stvarnog efektivnog mikroprofila

$h_{MAX} = 150 \text{ mm} \dots \dots$ - maksimalna visina stvarnog efektivnog mikroprofila

$h_{NMIN} = 0.2 \dots \dots \dots$ - minimalna vrednost normiranog efektivnog mikroprofila

$h_{NMAX} = 0.8 \dots \dots \dots$ - maksimalna vrednost normiranog efektivnog mikroprofila

Iz istog razloga (karakteristike sigmoide) potrebno je da i ulazne veličine leže unutar intervala koji odgovara strmom delu sigmoide, a što za $\theta=0$ odgovara relativnoj blizini koordinatnog početka. U slučaju geometrijskih parametara (l_{KONT} , L_P , H_P), posmatranjem korišćenih vrednosti lako se uočava da će ovaj uslov biti ispunjen ukoliko se njihove vrednosti uvrste u osnovnoj jedinici tj. u [m].

U slučaju da se umesto kontaktne dužine kao pokazatelj radnog režima koristi vertikalno opterećenje točka G_T , prikladno je koristiti normiranu vrednost sa odnosom na referentni maksimalni nivo:

$$G_{TN} = \frac{G_T}{G_{TMAX}} \dots\dots\dots(57.)$$

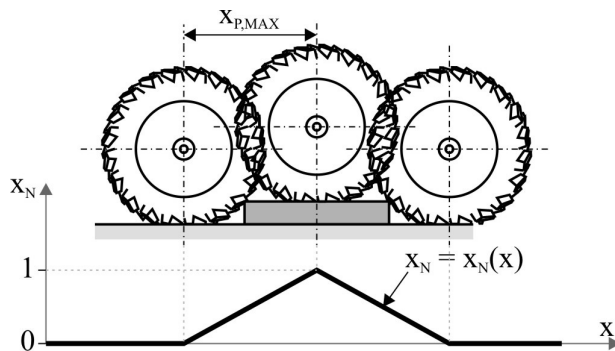
G_{TN} - normirana vrednost vertikalnog opterećenja točka

G_{TMAX} - referentna maksimalna vrednost vertikalnog opterećenja točka

Što se tiče parametra položaja točka u odnosu na prepreku, usvojen je nešto drugačiji pristup. Naime, pri različitim eksperimentalnim uslovima (varijacije l_{KONT} , L_P , H_P) razlikuju se dužine odziva. Sa ciljem da relativni položaj točka u odnosu na prepreku bude jednoznačno definisan u svim uslovima, uveden je normirani položaj točka x_N prema sledećim kriterijumima:

- pri ostvarivanju inicijalnog kontakta između točka i prepreke, kao i pre toga: $x_N = 0$;
- pri daljem nailaznom kretanju točka preko prepreke x_N linearno raste;
- pri nailasku točka na sredinu poprečnog preseka prepreke x_N dostiže maksimalnu vrednost $x_N = 1$;
- pri daljem silaznom kretanju točka x_N opada simetrično u odnosu na vertikalnu osu simetrije prepreke.

Opisani koncept za određivanje normiranog relativnog položaja točka u odnosu na prepreku grafički je prikazan na slici 72.



Slika 72. Definisiranje normiranog položaja točka u odnosu na prepreku, x_N

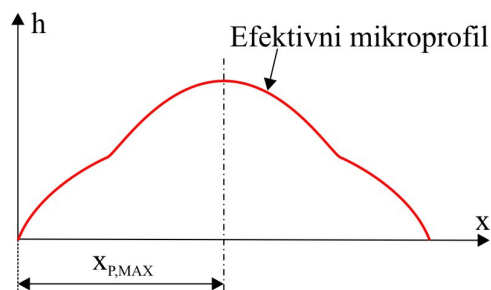
Shodno navedenom, x_N se može izračunati iz relacije:

$$x_N = 1 - \frac{|x_P|}{x_{P,MAX}} \dots\dots\dots(58.)$$

x_N - normirani relativni položaj točka u odnosu na prepreku

- x_P - rastojanje vertikalne ose točka od vertikalne ose simetrije prepreke (slika 70)
- $x_{P,MAX}$- maksimalna vrednost x_P (rastojanje između vertikalne ose točka pri inicijalnom kontaktu sa preprekom i vertikalne ose simetrije prepreke, slika 72)

Iako se vrednost $x_{P,MAX}$ može izračunati iz geometrijskih uslova na osnovu veličine ugiba i slobodnog radijusa pneumatika, najprikladniji način za određivanje ove veličine je na osnovu rezultata merenja, kao polovina ukupne dužine odziva u datim uslovima, slika 73.

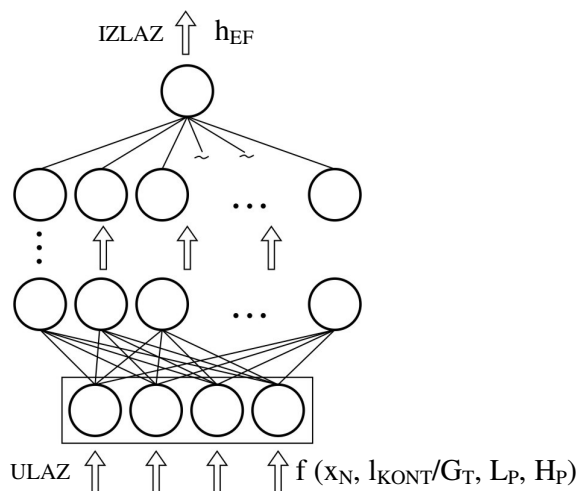


Slika 73. Određivanje vrednosti rastojanja između vertikalne ose točka pri inicijalnom kontaktu sa preprekom i vertikalne ose simetrije prepreke, $x_{P,MAX}$, iz rezultata merenja

8.4 Utvrđivanje osnova za razvoj neuronske mreže

8.4.1 IZBOR ULAZNO/IZLAZNIH VELIČINA I OSNOVNE STRUKTURE NEURONSKE MREŽE

Zadatak neuronske mreže koju treba formirati je da modelira kvazistatičku envelopu tj. geometrijska filtrirajuća svojstva kotrljanja pneumatika preko singularne prepreke pravougaonog poprečnog preseka. Ulazne i izlazne veličine definisane su u okviru prethodne tačke. Na slici 74 prikazan je opšti oblik strukture ovakve neuronske mreže.



Slika 74. Osnovna struktura neuronske mreže i ulazno/izlaznih podataka

Zadatak koji sledi je da se nađu optimalni pristupi u smislu:

- načina zadavanja ulaznih podataka,
- izbora optimalne topologije neuronske mreže,
- izbora parametara neuronske mreže i neurona (funkcija učenja, transfer funkcija itd.), i
- izbora setova podataka za obuku, validaciju i testiranje neuronske mreže

Za ovu vrstu problema karakteristično je odsustvo jednoznačnog pristupa koji vodi ka njihovom optimalnom rešenju. Zbog toga je neophodno rešavanju pristupiti usvajajući eksperimentalno-iterativni pristup, prema mogućnosti uzimajući u obzir iskustvene smernice za rešavanje parcijalnih segmenata problema. Pri tome je potrebno imati u vidu specifičnosti koje važe za konkretan slučaj. U nastojanju da se dođe do najbolje kombinacije, neophodno je u određenoj meri koristiti princip probe i greške i u iterativnom postupku odabrati ona rešenja koja daju najbolje rezultate. Mora se imati u vidu da se problem, iako se sastoji iz više segmenata, mora rešavati kao celina. Takođe je ponekad teško razdvojiti jedan segment rešavanja problema od drugog, npr. izabrani način zadavanja ulaznih podataka može uticati na optimalnu topologiju mreže i sl. Ukoliko veći broj pristupa daje podjednak nivo tačnosti rezultata, pri konačnom izboru treba uzeti u obzir kriterijume kao što su brzina izvršavanja, jednostavnost strukture, jednostavnost korišćenja modela i sl.

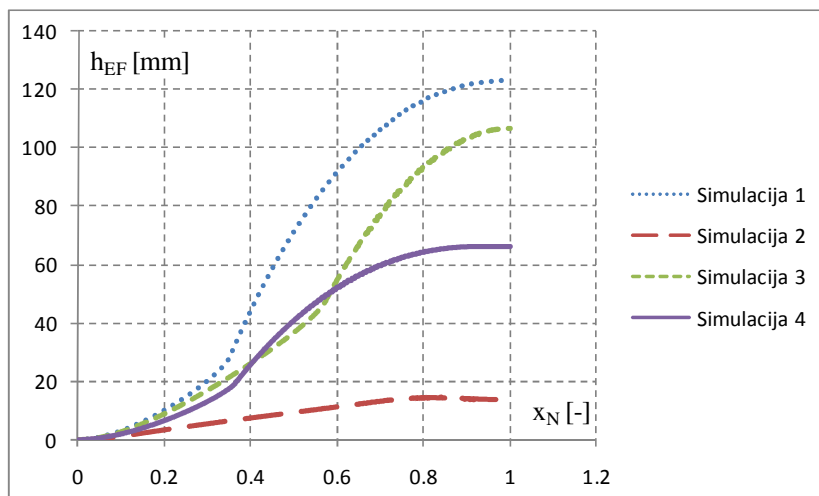
8.4.2 SMERNICE ZA IZBOR TOPOLOGIJE MREŽE I NAČINA ZADAVANJA PODATAKA ZA OBUKU

Ulazne veličine

Grupu ulaznih podataka (položaj točka, visina i dužina prepreke, kontaktna dužina) moguće je zadati na više načina. Neki od mogućih načini zadavanja diskutovanih u

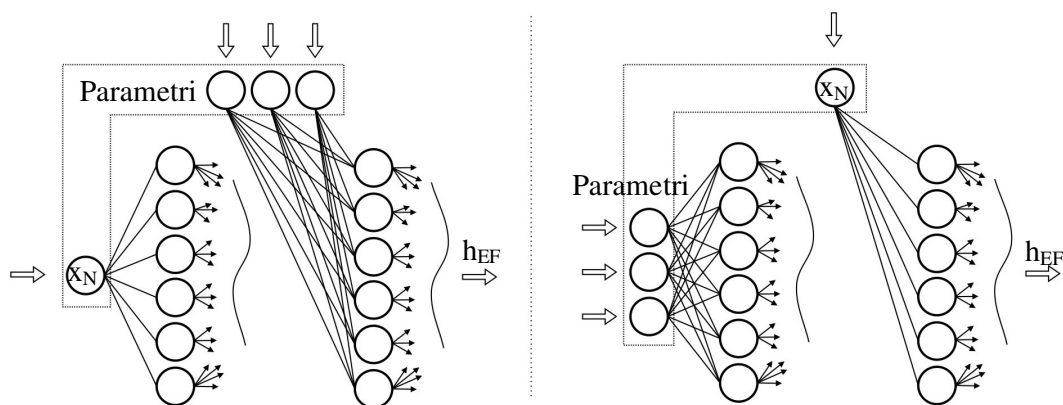
nastavku uslovljavaju topologiju mreže u smislu broja skrivenih slojeva ili nivoa povezanosti ulaznog sloja sa skrivenim.

Vrednosti ulaznih veličina mogu se zadati eksplicitno ili implicitno. Dalje, ulazne veličine koje se saopštavaju neuronskoj mreži mogu se, u smislu značenja za model, na osnovu svoje prirode podeliti na nezavisno promenljive veličine i parametre. S obzirom na prirodu nastanka kvazistatičke envelope, položaj točka u odnosu na prepreku može se posmatrati kao nezavisno promenljiva veličina, dok se ostale ulazne veličine modela (I_{KONT} odn. G_T , L_P i H_P) mogu posmatrati kao parametri, slika 75.

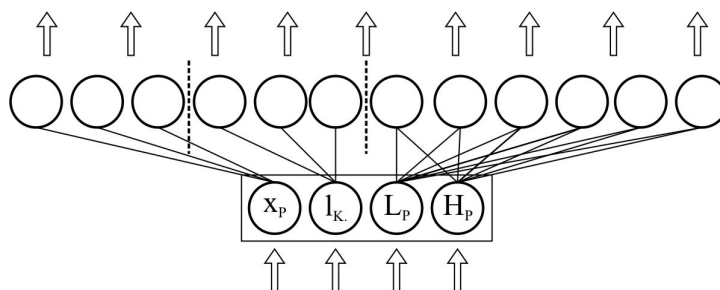


Slika 75. Kvazistatička envelope sa normiranim položajem točka u odnosu na prepreku, x_N , kao nezavisno promenljivom veličinom i pokazateljima radnog režima odnosno geometrije prepreke kao parametrima: Simulacija 1 – $G_T=8436$ N, $L_P=371$ mm, $H_P=123$ mm; Simulacija 2 – $G_T=19190$ N, $L_P=280$ mm, $H_P=25$ mm; Simulacija 3 – $G_T=16983$ N, $L_P=377$ mm, $H_P=109$ mm; Simulacija 4 – $G_T=4871$ N, $L_P=376$ mm, $H_P=66$ mm;

U kontekstu grupisanja ulaznih veličina na nezavisno promenljivu i parametre, pretpostavlja se da je svrsishodno ispitati da li se može postići poboljšanje performansi neuronske mreže tako što bi se odabrala odgovarajuća specifična topologija mreže koja uvažava ovakvu strukturu ulaznih podataka. Naime, jedan mogući pristup je da mreža sadrži najmanje dva ili više skrivenih slojeva, pri čemu bi podatak o položaju točka kao nezavisno promenljiva veličina bio uveden na podrazumevan način odnosno sa ulaza na prvi skriveni sloj pa nadalje, dok bi parametarski podaci bili sa ulaza prosleđeni direktno drugom odnosno narednim skrivenim slojevima. Šematski prikaz ovakvog pristupa prikazan je na slici 76. Još jedno od mogućih rešenja ovog tipa je nepotpuna povezanost – npr. skriveni sloj se sastoji od 12 neurona tako da je svaki od ulaznih povezan samo sa po tri skrivena, ili su parametri geometrije potpuno povezani sa 9 skrivenih neurona (slika 77), itd. Da li je neki od navedenih koncepata svrsishodan, odnosno da li se ovim putem mogu postići poboljšanja parametara mreže u odnosu na mrežu opšte konfiguracije odnosno sa potpunom povezanošću slojeva, potrebno je proveriti eksperimentalnim putem.



Slika 76. Uvođenje različitih grupa ulaznih podataka (nezavisno promenljiva i parametri) na različite slojeve neuronske mreže



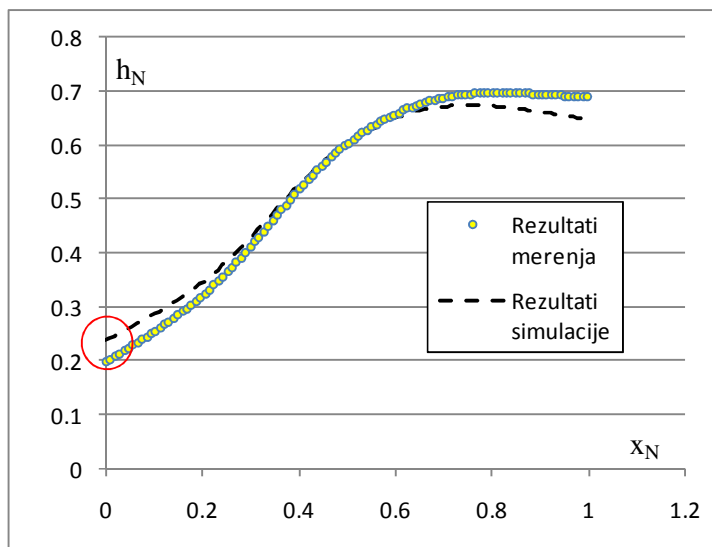
Slika 77. Jedna mogućnost grupisanja ulaznih podataka putem nepotpunog povezivanja slojeva

Način saopštavanja ulaznih parametara modelu nije jednoznačno određen. Najjednostavnije rešenje je direktno zadavanje ulaznih veličina u eksplicitnoj formi, nakon bazične obrade i normiranja. Alternativno, moguće je osmisliti izvedene veličine zasnovane na osnovnim veličinama x_N , l_{KONT}/G_T , H_P i L_P . Na taj način bi ovi parametri implicitno figurisali u ulaznim podacima.

Izlazna veličina

Izlaznu veličinu mreže predstavlja podatak o visini efektivnog mikroprofila. Ovaj podatak može se uključiti u set za obuku u svojoj eksplicitnoj formi, u normiranom obliku. Ipak, jedan vid odstupanja predviđanja modela od eksperimentalnih rezultata koji će ovde biti bliže prikazan navodi na ideju o iznalaženju alternativnih rešenja.

Reč je o odstupanju predviđanja visine efektivnog mikroprofila u trenutku uspostavljanja inicijalnog kontakta između točka i prepreke, slika 78. Početno odstupanje, naime, dovodi do izraženog narušavanja valjanosti rezultata simulacije. Mehanizam ovog dejstva objašnjen je u nastavku.



Slika 78. Primer odstupanja predviđanja modela u odnosu na ponašanje stvarnog sistema

Odstupanja modela koja se javle u kasnijem toku simulacije nisu u tolikoj meri kritična kao ovo početno. S obzirom na to da se efektivni mikroprofil saopštava oscilatornom modelu elastične strukture pneumatika kao pobuda, nagla i skokovita promena visine kakva se javlja kod modela čiji rezultati su prikazani na slici 78 pobuđuje sistem udarnim dejstvom. Probna sprovođenja simulacija vršena u početnim fazama razvoja modela pokazala su da je dejstvo ovog efekta veoma izraženo čak i pri veoma malim odstupanjima, u meri da rezultati simulacije značajno odstupaju od odziva stvarnog pneumatika u posmatranim uslovima te se stoga ne mogu smatrati validnim.

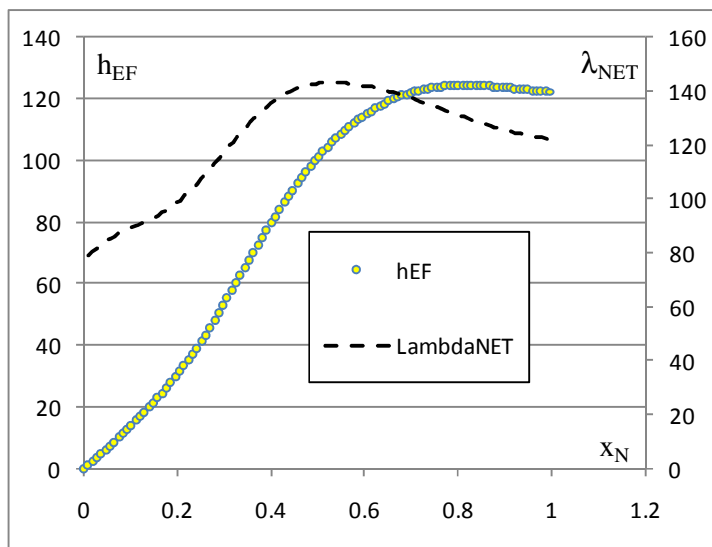
Kako je odstupanje u određenim granicama fenomen koji se pri modeliranju realnih sistema praktično nikada ne može u potpunosti isključiti, to postoji opasnost da se, bez obzira na stepen sposobnosti generalizacije neuronske mreže nakon obuke, pod određenim okolnostima javi navedeni problem.

Da bi se elininisala razmatrana mogućnost narušavanja validnosti modela odnosno simulacije, osmišljen je alternativni koncept zadavanja izlaznog pokazatelja upotrebom sinusne funkcije u kojoj se kao argument koristi normirani položaj točka u odnosu na podlogu, i u ovu svrhu uvedenog korektivnog empirijskog koeficijenta označenog sa λ_{NET} :

$$h_{EF} = \lambda_{NET} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot x_N\right) \dots\dots\dots(59.)$$

λ_{NET} - korektivni empirijski koeficijent

Iz gornje relacije je očigledno da će pri inicijalnom kontaktu točka sa preprekom, što je trenutak u kom prema definiciji normiranog položaja (relacija /58/, slika 72) važi $x_N = 0$, visina efektivnog profila uvek biti $h_{EF} = 0$. Primer toka vrednosti parametra λ_{NET} u funkciji x_N za $x_N \in [0, 1]$ prikazan je na dijagramu na slici 79.



Slika 79. Primer toka vrednosti parametra λ_{NET} u zavisnosti od x_N

Usvajanjem ovog pristupa, koeficijent λ_{NET} se izračunava na osnovu veličina h_{EF} i x_N dobijenih prilikom sprovođenja eksperimentalnih ispitivanja. Tada se neuronska mreža obučava da, za iste ulazne veličine kao i za slučaj direktnog modeliranja h_{EF} , predviđa vrednost λ_{NET} :

$$\lambda_{NET} = \lambda_{NET}(x_N, I_{KONT}/G_T, L_P, H_P)$$

Aplikacija modela tada obuhvata i izračunavanje veličine h_{EF} prema relaciji (59).

Prema relaciji (59), parametar λ_{NET} predstavlja količnik efektivnog profila i sinusne funkcije, pri čemu obe vrednosti teže nuli kada $x_N \rightarrow 0$. Odavde se može zaključiti da za $x_N = 0$ parametar λ_{NET} ima konačnu vrednost, na šta upućuje i tok dijagrama na slici 79. Ipak, zbog numeričkih ograničenja pri sprovođenju kalkulacija pomoću računara poželjno je izbegavati izračunavanje vrednosti λ_{NET} za vrednosti x_N veoma bliske nuli. Ovakav stav, zbog značajnog rasipanja rezultata merenja, pogotovo važi za rezultate fizičkog eksperimenta (u poređenju sa virtuelnim). Može se očekivati da dobro trenirana neuronska mreža daje tačna predviđanja granične vrednosti parametra λ_{NET} za $x_N = 0$. Ovo, međutim, nije od značaja jer je u tim uslovima izlaz modela zbog člana $\sin(0)$ svakako $h_{EF} = 0$, što i jeste cilj uvođenja ovog pristupa.

Vrednosti za faktor λ_{NET} takođe je potrebno normirati. Slično kao pri normiranju veličine h_{EF} prema relaciji (56), važi:

$$\lambda_{NET,N} = \frac{\lambda_{NET,N,MAX} - \lambda_{NET,N,MIN}}{\lambda_{NET,MAX} - \lambda_{NET,MIN}} \cdot (\lambda_{NET} - \lambda_{NET,MIN}) + \lambda_{NET,N,MIN} \dots\dots\dots (60.)$$

$\lambda_{NET,N}$ - tekuća normirana vrednost parametra λ_{NET}

$\lambda_{NET,N,MIN}$ - minimalna normirana vrednost parametra λ_{NET}

$\lambda_{NET,N,MAX}$ - maksimalna normirana vrednost parametra λ_{NET}

$\lambda_{NET,MIN}$ - minimalna vrednost parametra λ_{NET}

$\lambda_{NET,MAX}$ - maksimalna vrednost parametra λ_{NET}

Granice za normiranje su, kao i u slučaju veličine h_{EF} :

$$\lambda_{NET,N,MIN} = 0.2$$

$$\lambda_{NET,N,MAX} = 0.8$$

Na osnovu rezultata izračunavanja parametra λ_{NET} prema rezultatima fizičkih i virtuelnih eksperimenata, utvrđene su sledeće granične vrednosti:

$$\lambda_{NET,MIN} = - 10$$

$$\lambda_{NET,MAX} = 300$$

Na kraju treba pomenuti i sledeće: kako se vrednosti normiranog položaja točka x_N kreću između 0 i 1, pri definisanju relacije (59) očigledno se umesto sinusne funkcije mogla direktno koristiti vrednost x_N . Međutim, ideja upotrebe sinusne funkcije je smatrana prikladnijom s obzirom na to da oblik sinusoide na intervalu između 0 i $\pi/2$ ispoljava određen stepen sličnosti forme u odnosu na kvazistatičku envelopu kretanja. Pored toga, empirijske bazne funkcije za opisivanje envelope kretanja, pomenute u okviru tačke 3.4.3, takođe mogu biti zasnovane na sinusnoj funkciji, što je dodatno podstaklo usvajanje prikazanog pristupa.

8.4.3 POSTUPAK FORMIRANJA SETOVA PODATAKA ZA OBUKU NEURONSKIH MREŽA

Nakon bazičnog postupka obrade izvornih rezultata eksperimentalnih ispitivanja opisanih u tački 7.2, podaci stoje na raspolaganju za pripremu setova za obuku neuronske mreže. Za kreiranje ovih setova korišćeni su namenski programi napisani u jeziku C. Kod jedne od karakterističnih verzija programa dat je na priloženom CD-ROM-u. Verzije se među sobom razlikuju u maloj meri, npr. u pogledu pristupa u zadavanju izlaza mreže (h_{EF} ili λ_{NET} , tačka 8.4.2) i dr. Za potrebe ovog pristupa potrebno je da eksperimentalni rezultati budu dostupni u formi tekstualne datoteke u kojoj su podaci o normiranom položaju točka i odgovarajućim vrednostima visine efektivnog mikroprofila sortirani u dve kolone. Alternativno, datoteka može sadržati i izvorne vrednosti položaja točka u odnosu na prepreku tako da se njihovo normiranje vrši u okviru izvršenja programa.

Eksperimentalna merenja su, zbog kompenzacije rasipanja rezultata, vršena u po 10 serija, pri čemu se točak kretao veoma malim brzinama dok je frekvencija semplovanja iznosila 200 Hz. Stoga su podaci u pogledu prostornog rasporeda vrednosti položaja točka veoma brojni i raspoređeni blisko jedni drugima, što dovodi do značajnog stepena redundantnosti. Zbog toga je u okviru programa za kreiranje setova za obuku predviđena mogućnost filtriranja odnosno uzimanja u obzir samo onih podataka koji se nalaze na unapred određenom međusobnom odstojanju.

Na početku izvršavanja programa za kreiranje setova za obuku neuronskih mreža, korisniku se nudi mogućnost da izabere jedan od setova rezultata merenja. U tu svrhu, datotekama u kojima su smešteni rezultati merenja pri različitim vrednostima parametara eksperimenta (l_{KONT} , L_P , H_P) dodeljena su imena koja jednoznačno povezuju određeni set podataka sa eksperimentalnim uslovima kako je pokazano u tački 7.6.2, tabela 12. Tom prilikom se vrši i dodela odgovarajućih vrednosti promenljivama koje predstavljaju navedene parametre, kako bi naknadno ove vrednosti mogle biti upisane u grupu ulaznih podataka seta za obuku neuronske mreže (ulazni obrazac).

Program potom pristupa izabranoj datoteci i učitava parove podataka za položaj točka i visinu efektivnog mikroprofila. Ukoliko položaj točka zadovoljava navedeni kriterijum o minimalnom odstojanju u odnosu na prethodnu memorisanu vrednost, vrši se normiranje podataka i njihov upis u posebnu datoteku. Ovim vrednostima se takođe dodaju i vrednosti parametara l_{KONT} , L_P i H_P tako da se formira jedan ulazno – izlazni obrazac koji ima oblik:

Ulazno – izlazni obrazac				
ULAZ				IZLAZ
x_N	l_{KONT}	L_P	H_P	h_{EF}

Svaki red datoteke za obuku sastoji se od jednog ulazno-izlaznog obrasca. Obrazac se sastoji od vrednosti veličina normiranih prema postupcima objašnjenim u tačkama 8.3 odnosno 8.4.2. Prilikom upisivanja obrazaca vrši se njihovo prebrojavanje. Na kraju se formira standardizovano zaglavlje koje omogućava da datoteka bude prepoznatljiva programu za obuku neuronskih mreža SNNS odnosno JavaNNS. Ovo zaglavlje, između ostalog, sadrži podatak o ukupnom broju ulazno-izlaznih obrazaca. Primer zaglavlja sa prvih nekoliko ulazno-izlaznih obrazaca ima sledeći oblik:

```
SNNS pattern definition file V3.2
generated at Mon Oct 28 18:33:33 2013
```

```
No. of patterns : 79
No. of input units : 4
No. of output units : 1
```

```
0.000000    0.380000    0.095000    0.052000    0.203182
0.012795    0.380000    0.095000    0.052000    0.203016
0.025590    0.380000    0.095000    0.052000    0.204776
0.038385    0.380000    0.095000    0.052000    0.205904
0.051180    0.380000    0.095000    0.052000    0.208328
... itd.
```

Legenda (nije sadržana u originalnoj datoteci):

```
(    $x_N$             $l_{KONT}$             $L_P$             $H_P$             $h_{EF}$  )
<----- ULAZ -----> | <-IZLAZ->
```

U postupku kreiranja obrazaca za obuku na navedeni način formirani su setovi podataka na osnovu svakog seta eksperimentalnih obrazaca pojedinačno. Kako je u okviru korišćenog programa za obuku, međutim, za proces obuke moguće koristiti samo jednu jedinstvenu

datoteku, potrebno je, da bi se neuronskoj mreži koja se obučava saopštio širi spektar empirijskih podataka, objediniti veći broj bazičnih setova. Za ovo je prikladan postupak kopiranja i prenosa podataka iz jedne datoteke u drugu pomoću nekog od uobičajenih programa za bazično editovanje teksta. Pri tome je neophodno voditi računa o tome da se u zaglavlju unese tačan broj obrazaca koji novoformirana datoteka sadrži.

Opisani, relativno opširni, postupak formiranja setova podataka za obuku neuronskih mreža odnosi se na slučaj podataka dobijenih fizičkim eksperimentalnim ispitivanjima. U slučaju virtuelnog eksperimenta prema tački 7.7, postupak je nešto jednostavniji. U ovom slučaju za aplikaciju modela a samim tim i za generisanje rezultata simulacija korišćen je program Matlab. S obzirom na široke mogućnosti za direktnu manipulaciju numeričkim podacima koje ovaj program pruža, setovi podataka za obuku kreirani su relativno jednostavnom obradom rezultata simulacije i potom izvozom podataka u tekstualnu datoteku, u koju još na gore navedeni način manuelnim putem treba pridodati zaglavlje.

8.4.4 IZBOR SETA PODATAKA ZA OBUKU I KRITERIJUM ZA PREKID OBUKE

Kao što je opšti slučaj kod svih empirijskih modela, izbor seta empirijskih podataka na osnovu kojih se vrši obuka neuronske mreže jeste jedan od presudnih faktora za tačnost modela. Ovu činjenicu treba imati u vidu već prilikom planiranja izvođenja eksperimentalnih ispitivanja.

Pri izvođenju fizičkog eksperimenta ukupno je sprovedena 21 serija merenja sa variranjem eksperimentalnih parametara prema tabeli 12, tačka 7.6.2. Kako bi se kompenzovao nedostatak eksperimentalnih rezultata za slučajeve malih vrednosti kontaktne dužine (što odgovara malim vrednostima vertikalnog opterećenja), skup podataka je dopunjen računskim rezultatima kotrljanja krutog točka (odgovara slučaju $I_{KONT} = 0$ odnosno $G_T = 0$) preko 7 različitih prepreka korišćenih u eksperimentalnim ispitivanjima (tabela 11) čime je dobijeno još 7 setova podataka, što ukupno čini 28 kombinacija. Ovih 28 kombinacija vrednosti triju parametara (I_{KONT} , L_P , H_P) predstavlja prostor događaja raspoloživ za obuku neuronske mreže. Korišćenje raspoloživih setova podataka strukturirano je na sledeći način:

- 19 setova ($\approx 68\%$) korišćeno je za obuku neuronske mreže; (setovi: A, B, D, E, G, H, J, K, M, N, P, Q, S, T – tabela 12 kao i kotrljanje krutog točka preko prepreka P1, P2, P4, P5 i P8 – tabela 11)
- 5 setova ($\approx 18\%$) korišćeno je tokom obuke za kontrolu sposobnosti mreže da generalizuje (setovi: C, I, O, U i kotrljanje krutog točka preko prepreke P6)
- 4 seta ($\approx 14\%$) korišćena su za kasniju validaciju modela. (setovi: F, L, R i kotrljanje krutog točka preko prepreke P3)

U slučaju virtuelnog eksperimenta izvršeno je 100 simulacija sa različitim vrednostima eksperimentalnih parametara čije vrednosti su određene generisanjem slučajnih brojeva sa uniformnom raspodelom. Od ovih 100 setova podataka, odlučeno je da približno dve trećine bude korišćeno za obuku, približno jedna trećina za kontrolu sposobnosti generalizacije tokom obuke i približno jedna trećina za validaciju. Setovi podataka su po rednim brojevima podeljeni na šestočlane grupe, tako da su u okviru svake grupe prvi, drugi, četvrti i peti set korišćeni za obuku, treći set za kontrolu generalizacije i šesti set za

obuku. Ovaj princip je korišćen okvirno, sa neznatnim odstupanjima od navedenog principa tako da je blaga prednost data upotrebi setova za kontrolu generalizacije u odnosu na upotrebu setova za validaciju. Konačna struktura formirana je izborom:

- 67 setova za obuku;
- 18 setova za kontrolu sposobnosti mreže da generalizuje;
- 15 setova za validaciju modela.

U skladu sa principima obuke neuronskih mreža opisanim u poglavlju 4, kao kriterijum za prekid obuke neuronskih mreža (odnosno utvrđivanje optimalnog broja ciklusa učenja) korišćen je minimum krive ukupne greške seta podataka za kontrolu sposobnosti generalizacije.

8.5 Obuka, izbor optimalne neuronske mreže i validacija modela

8.5.1 KONCEPT RAZVOJA I VALIDACIJE MODELA ZASNOVANIH NA VNM

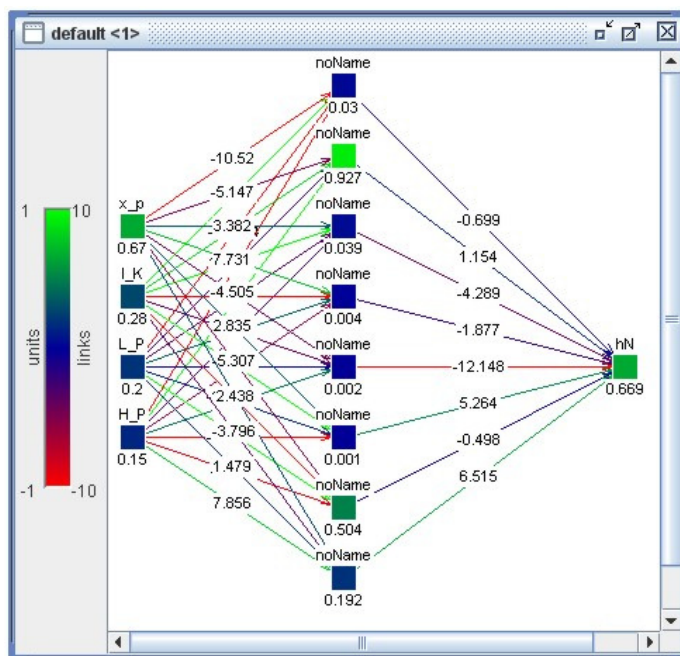
Kako je objašnjeno u okviru teorijskog razmatranja neuronskih mreža i njihovih opštih svojstava (poglavlje 4), optimalni izbor konfiguracije neuronske mreže sa aspekta modeliranja posmatranog sistema ili pojave je problem za čije rešenje ne postoji jednoznačno definisan pristup. Stoga je potrebno obuku sprovoditi za različite konfiguracije mreža kako bi se eksperimentalnim putem utvrdilo koja od njih daje najbolje rezultate.

Tokom obuke neuronske mreže, kriterijum za izbor optimalnog broja ciklusa obučavanja predstavlja minimum greške kontrolnog seta za obuku, koji se koristi za ocenu sposobnosti mreže da generalizuje. Ovaj podatak, međutim, sam po sebi nije dovoljan za ocenu valjanosti neuronske mreže kao forme empirijskog modela. Za konačnu ocenu neophodno je kvantitativno proveriti slaganje izlaza mreže sa eksperimentalnim rezultatima onih setova podataka koji nisu korišćeni u procesu obuke.

Tek nakon ovakve provere, koja se sprovodi za veći broj obučanih neuronskih mreža različitih konfiguracija, moguće je utvrditi koja od njih na optimalan način odgovara datim zahtevima. Postupak upoređivanja eksperimentalnih podataka sa predviđanjima empirijskog modela za setove podataka koji nisu korišćeni pri njegovom formiranju zapravo predstavlja validaciju modela. Iz svega navedenog se može zaključiti da u procesu formiranja modela zasnovanog na veštačkoj neuronskoj mreži validacija predstavlja integralni deo samog postupka razvoja modela. Po tome se ovakvi modeli razlikuju od konvencionalnih empirijskih modela kod kojih se validacija sprovodi kao zasebna etapa.

U preliminarnom radu isprobane su varijante sa različitim koncepcijama mreže i načinima zadavanja ulaznih podataka prema idejama predstavljenim u okviru tačke 8.4.2. Prikaz ovih preliminarnih rezultata je izostavljen, s obzirom na to da bi obim ovakvog prikaza znatno prevazišao njegov značaj. Na ovom mestu važno je istaći ključni zaključak proistekao iz ove faze rada, a to je da optimalno rešenje strukture neuronske mreže predstavlja potpuno povezana mreža sa jednim skrivenim slojem i sa eksplicitnim zadavanjem ulaznih podataka. Primer šematskog prikaza ovakve mreže sa 8 skrivenih

neurona u programu JavaNNS dat je na slici 80. Na prikazu se uočavaju vrednosti sinaptičkih koeficijenata posmatrane mreže.



Slika 80. Grafički prikaz strukture neuronske mreže u programu JavaNNS

U okviru izbora optimalne konfiguracije neuronske mreže preostaje utvrđivanje optimalnog broja skrivenih neurona. Proces učenja metodom vođenja greške unazad, opisan u tački 4.2.4, u velikoj meri zavisi i od izbora tzv. faktora učenja α , uvedenog u okviru relacije (5). Veličina ovog faktora određuje intenzitet modifikovanja sinaptičkih koeficijenata, čime se vrši uticaj na brzinu konvergencije procesa obuke odnosno na verovatnoću nalaženja lokalnih minimuma greške. Optimalna veličina ovog parametra takođe nije unapred poznata. S druge strane, inicijalizacija neuronske mreže koja predstavlja dodeljivanje slučajnih vrednosti sinaptičkim koeficijentima, utiče na rezultate procesa obuke. Stoga je moguće da se, sa jednom istom vrednošću faktora učenja i pri istoj konfiguraciji mreže, pri ponovljenoj obuci dobiju različiti rezultati. Iz ovih razloga, za svaku isprobanu konfiguraciju neuronske mreže obuka je sprovedena veći broj puta za različite vrednosti parametra α (obično 5÷7 vrednosti, uglavnom iz intervala $\sim 0.2 \div \sim 1.5$). U nekim slučajevima proces je sproveden tako da je i za svaku od vrednosti faktora α vršeno jedno ili dva ponavljanja celog ciklusa. Smatrano je da bi se na taj način, povećavanjem verovatnoće pronalaženja globalnog minimuma greške, mogla postići veća tačnost modela. Ovaj pristup, međutim, nije doveo do poboljšanja rezultata, pa se u daljem toku rada zbog uštede vremena od njega odustalo.

U tački 8.4.2 takođe je diskutovana mogućnost da se kao izlazna veličina mreže zada ili eksplicitan podatak o visini efektivnog mikropodloga h_{EF} , ili korektivni empirijski faktor λ_{NET} prema izrazu (59). U daljem toku rada ravnopravno su korišćena oba pristupa. Odluka o tome kom od njih treba dati prednost ostavljena je za fazu aplikacije modela, tj. integracije modela kvazistatičke envelope i modela elastične strukture u funkciji modeliranja dinamičkog odziva pneumatika na podlogama sa kratkotalasnim neravninama.

8.5.2 UPOTREBA REZULTATA OBUČENE MREŽE

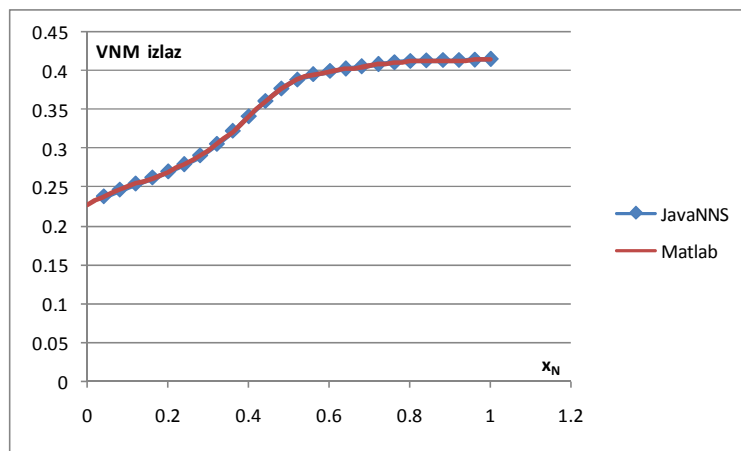
Primena rezultata obučene neuronske mreže zasnovana je na izračunavanju vrednosti izraza (7), tačka 4.3, u okviru kog se takođe koriste relacije (1), (3) i (4), tačka 4.2.1. Najprikladniji način za ova izračunavanja predstavlja kreiranje računarskog programa koji, na osnovu zadatih vrednosti parametara neuronske mreže (numeričke vrednosti sinaptičkih koeficijenata w_{ij} i praga pojedinačnih neurona θ_i) izvršava potrebne kalkulacije. Rezultati ovih izračunavanja mogu se koristiti samostalno u procesu validacije modela, ili mogu, preko odgovarajućeg softverskog interfejsa, biti prosleđeni modelu elastične strukture pneumatika (šematski prikaz: slika 1, uvodno poglavlje), ako je reč o aplikaciji modela.

Kod odgovarajućeg računarskog programa za primenu modela na bazi neuronske mreže, implementiranog u programskom jeziku Matlab, dat je na priloženom CD-ROM-u.

Vrednosti sinaptičkih koeficijenata w_{ij} i pragova θ_i , potrebnih za primenu modela, potrebno je pre primene ekstrahovati iz datoteka u kojima program JavaNNS skladišti podatke o konfiguraciji neuronske mreže. Ove datoteke su tekstualnog formata, što olakšava pristup podacima upotrebom standardnih softverskih rešenja. Jedna od mogućnosti za prenos podataka o parametrima mreže iz konfiguracione datoteke u program za aplikaciju modela je manuelno prenošenje ("prekucavanje" vrednosti). Ovaj pristup je u datom kontekstu, međutim, neprikladan. U postupku utvrđivanja optimalne konfiguracije neuronske mreže, kako je pokazano, isprobavan je veći broj konfiguracija potpuno povezanih mreža sa različitim brojevima skrivenih neurona. Posledica je figurisanje velikog broja numeričkih podataka čije bi ručno prenošenje bilo praćeno:

- neproporcionalnim utroškom vremena,
- povećanom verovatnoćom pojave greške u prenosu podataka, kao i
- veoma otežanom identifikovanju i lociranju eventualnih grešaka.

Iz navedenih razloga, za ekstrahiranje parametara neuronske mreže i njihovo uvođenje u program za aplikaciju modela osmišljen je postupak u okviru koga se do rezultata dolazi kombinovanjem upotrebe standardnih računarskih programa za obradu tekstualnih i tabelarnih podataka sa namenskim programom za manipulaciju tekstualnim datotekama pisanim u jeziku C. Prikaz ovog postupka je izostavljen, s obzirom na to da je reč o postupku nešto udaljenijem od centralne teme istraživanja, kao i da predstavlja specifično rešenje vezano za način manipulacije podacima o konfiguraciji neuronske mreže korišćen od strane programa SNNS/JavaNNS. Provera valjanosti postupka demonstrirana je upoređivanjem vrednosti izlaza neuronske mreže dobijenih direktno primenom programa JavaNNS sa rezultatima simulacije neuronske mreže pomoću programa u jeziku Matlab, za koju su korišćene vrednosti parametara dobijene navedenim postupkom. Demonstracija je potvrdila ispravnost postupka, pokazavši potpuno slaganje odgovarajućih setova podataka. Jedan primer prikazan je na dijagramu na slici 81.



Slika 81. Poređenje rezultata neuronske mreže dobijenih pomoću programa JavaNNS i Matlab u funkciji provere ispravnosti programa za implementaciju modela zasnovanog na neuronskoj mreži

8.5.3 FORMIRANJE MODELA NA BAZI REZULTATA FIZIČKOG EKSPERIMENTA

Obuka za slučaj kada izlaz mreže predstavlja visina efektivnog mikroprofila h_{EF}

Obuka neuronskih mreža je, na osnovu razmatranja iz prethodne tačke, sprovedena za njihove različite konfiguracije, pri čemu je za svaku konfiguraciju vršeno više ciklusa sa različitim vrednostima faktora učenja α . Detaljniji komparativni prikaz grafikona greške setova podataka za obuku i za kontrolu sposobnosti generalizacije u zavisnosti od broja ciklusa učenja je dat na priloženom CD-ROM-u. Kratak rezime postignutih rezultata prikazan je u tabeli 16.

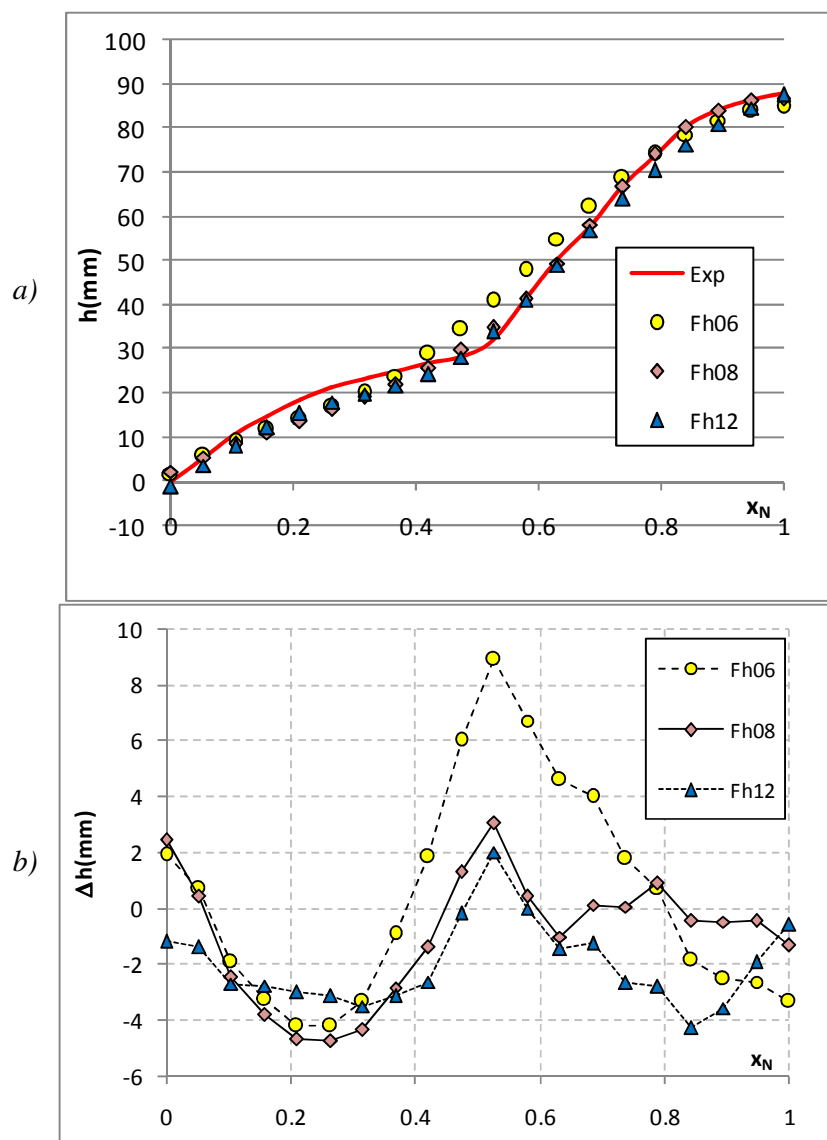
Tabela 16. Rezultati obuke neuronskih mreža korišćenjem rezultata fizičkog eksperimenta, za slučaj kada izlaz mreže predstavlja eksplicitna vrednost visine efektivnog mikroprofila h_{EF}

Broj neurona u skrivenom sloju	Najbolja postignuta tačnost (minimum kumulativne greške seta za kontrolu)	Broj sprovedenih ciklusa obuke
6	≈ 0.075	100000
8	≈ 0.035	200000
12	≈ 0.025	300000
16	Nisu postignuti bolji rezultati; za $\alpha=0.25$ i 0.5 obuka je produžena do 10^6 ciklusa ali bez posebnog poboljšanja rezultata	

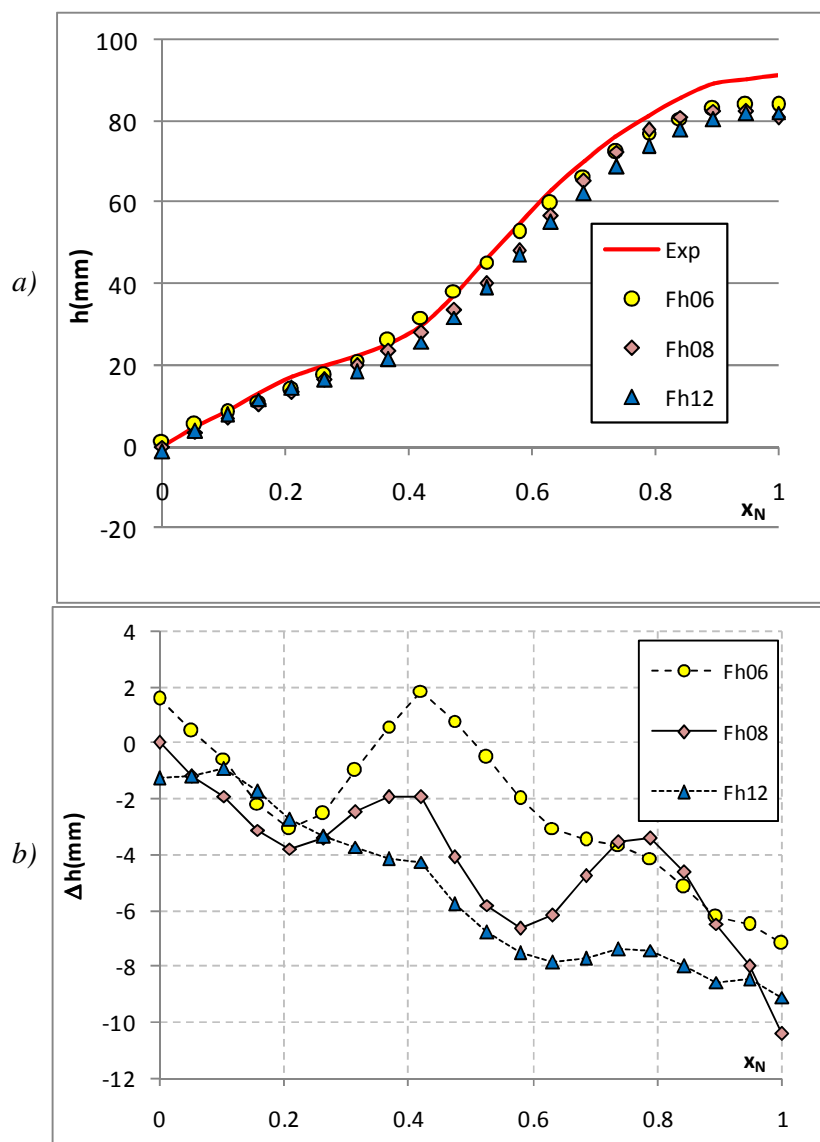
Rezultati prikazani u tabeli 16 pružaju preliminarne informacije o međusobnim odnosima performansi modela zasnovanih na neuronskim mrežama različitih konfiguracija. Međutim, kako je već istaknuto u poglavlju 4, za prosuđivanje o kvalitetu predviđanja neuronske mreže nije dovoljno koristiti podatke o grešci seta podataka za kontrolu validacije, već je neophodno proveriti konkretne rezultate mreže za setove podataka koji nisu bili korišćeni u procesu obuke. Zbog toga je izvršena detaljnija komparativna analiza u ovom smislu za mreže sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju. S obzirom na to da korišćenjem 16 skrivenih neurona nije postignuto poboljšanje rezultata pri obuci, a uzimajući u obzir osobinu neuronskih mreža da u opštem slučaju sa povećanjem broja skrivenih neurona sposobnost generalizacije opada¹⁴, rezultati simulacija za ovu konfiguraciju mreže nisu razmatrani.

U nastavku su na slikama 82, 83 i 84 prikazani karakteristični primeri rezultata obuke neuronskih mreža za setove podataka "F", "L" i "R" koji nisu bili korišćeni u procesu obuke. Karakteristike setova podataka prema navedenim oznakama definisane su u tabeli 12 (tačka 7.6.2). Prikaz rezultata obuhvata poređenje rezultata simulacije sa osrednjenim rezultatima merenja, za slučaj tri navedene konfiguracije neuronskih mreža (6, 8 odn. 12 neurona u skrivenom sloju). Pored toga, prikazani su i dijagrami apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih osrednjenih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima.

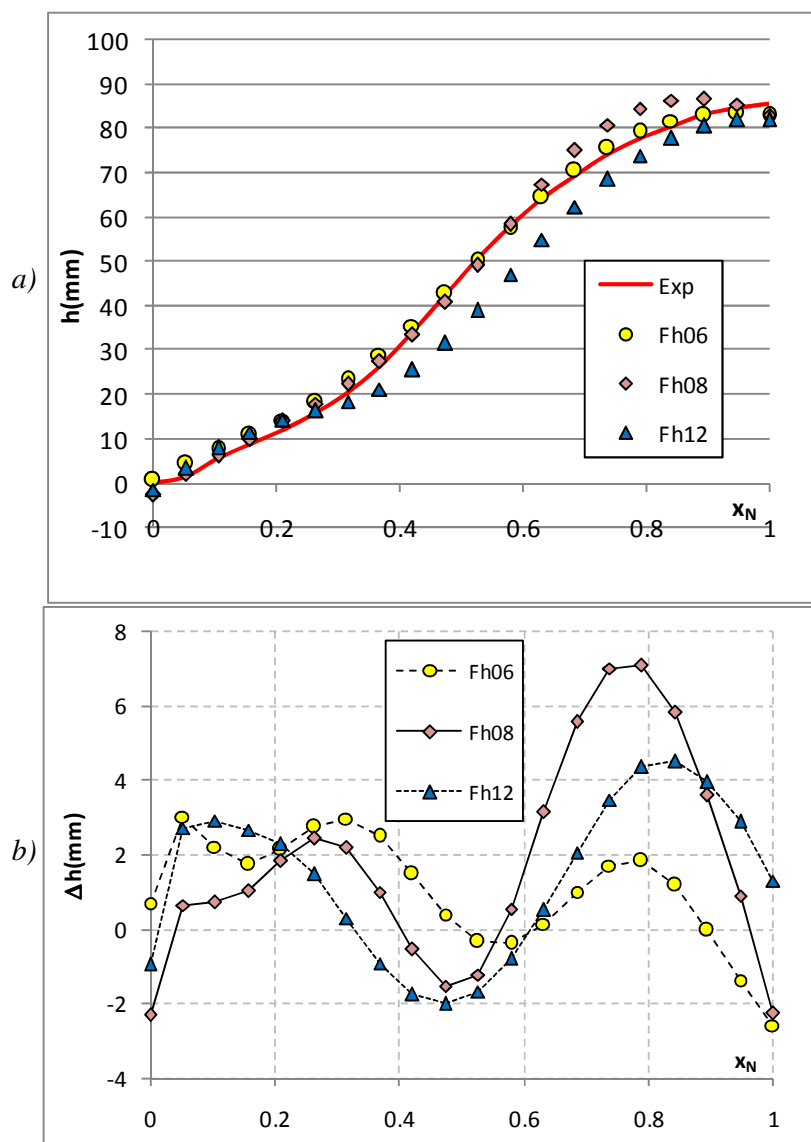
¹⁴ Ovo svojstvo je analogno sa istom osobinom regresionih polinoma pri povećanju njihovog stepena.



Slika 82. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "F" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "Fh06", "Fh08" i "Fh12" respektivno) sa osrednjenim rezultatima eksperimentalnih merenja (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih osrednjenih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 83. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "L" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "Fh06", "Fh08" i "Fh12" respektivno) sa osrednjenim rezultatima eksperimentalnih merenja (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih osrednjenih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 84. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "R" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "Fh06", "Fh08" i "Fh12" respektivno) sa osrednjenim rezultatima eksperimentalnih merenja (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih osrednjenih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja

Rezultati prikazani na slikama 82, 83 i 84 pokazuju da su vrednosti odstupanja, generalno uzevši, relativno male u odnosu na referentne rezultate eksperimentalnih merenja. Ovo ukazuje na visok stepen slaganja predviđanja modela sa rezultatima merenja. Međutim, takođe je važno uočiti generalnu tendenciju ka odstupanju nultih vrednosti. Kako je objašnjeno u okviru tačke 8.4.2 (slika 78), nagla i skokovita promena visine efektivnog

mikroprofila kakva se javlja u ovakvim slučajevima pobuđuje oscilatorni sistem odnosno elastičnu strukturu pneumatika intenzivnim udarnim dejstvom čak i pri vrlo malim vrednostima ovih odstupanja, tako da rezultati simulacije spregnutog modela kvazistatičke envelope i elastične strukture pneumatika više ne odgovaraju ponašanju stvarnog pneumatika. Nemogućnost da se u opštem slučaju izbegnu netačnosti ovog tipa uslovlila je ideju uvođenja empirijskog korektivnog faktora λ_{NET} (tačka 8.4.2, relacija /59/, slika 79).

Radi upotpunjavanja komparativnog prikaza performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija, u tabeli 17 prikazane su vrednosti srednje kvadratne greške modela za različite setove podataka (oznake setova prema tabelama 12 i 13, tačka 7.6.2). Srednje kvadratno odstupanje računato je u svim slučajevima prema relaciji (47), tačka 7.6.4, kao kumulativna razlika između predviđanja modela i osrednjenog rezultata eksperimentalnog merenja u 20 tačaka, odnosno za 20 vrednosti normirane uzdužne koordinate x_N . U istoj tabeli su takođe prikazane sumarne vrednosti srednjih kvadratnih odstupanja odnosno njihove osrednjene vrednosti za pojedine konfiguracije neuronskih mreža.

Tabela 17. Vrednosti srednje kvadratne greške neuronskih mreža za različite setove podataka

Oznaka seta podataka (prema tabelama 12 i 13)		Broj neurona u skrivenom sloju		
		6	8	12
		Srednja kvadratna greška[mm]		
Setovi podataka korišćenih za testiranje VNM	F	3.96	2.46	2.55
	L	3.59	4.97	6.21
	R	1.84	3.40	2.55
	P30	4.37	2.89	1.43
Setovi podataka korišćenih za kontrolu sposobnosti generalizacije	C	5.00	2.97	2.75
	I	2.94	1.28	2.89
	O	2.83	1.95	1.33
	U	4.73	2.34	2.14
	P60	4.09	2.77	1.90
Setovi podataka korišćenih za obuku VNM	E	2.02	2.40	2.69
	J	3.46	1.16	1.92
	N	3.39	1.59	2.34
	T	3.32	1.61	1.43
	P40	3.27	1.12	1.37
Suma vrednosti srednje kvadratne greške		48.82	32.93	33.50
Aritmetička sredina vrednosti sr. kv. greške		3.49	2.35	2.39

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 17, u smislu prosečne vrednosti srednjeg kvadratnog odstupanja neuronske mreže sa 8 odnosno 12 neurona u skrivenom sloju poseduju veoma slične performanse, dok su u slučaju mreže sa 6 skrivenih neurona rezultati nešto lošiji. Rezultati prikazani na slikama 82, 83 i 84 su u skladu sa pokazateljima iz tabele 17. S obzirom na to da se teži izboru što jednostavnije

konfiguracije modela, između analiziranih konfiguracija neuronskih mreža se kao optimalna može usvojiti ona sa 8 neurona u skrivenom sloju.

Zaključak: između ispitanih konfiguracija za dati slučaj obuka neuronske mreže na čijem izlazu se nalazi visina efektivnog mikroprofila h_{EF}^{15} , zasnovana na empirijskim podacima dobijenih fizičkim eksperimentom), kao optimalna konfiguracija bira se neuronska mreža sa 8 neurona u jednom skrivenom sloju.

Obuka za slučaj kada izlaz mreže predstavlja empirijski faktor λ_{NET}

Kao i u prethodnom slučaju, obuka je sprovedena sa različitim brojevima skrivenih neurona, pri čemu je za svaku konfiguraciju vršeno ponavljanje za različite vrednosti faktora α . Na priloženom CD-ROM-u prikazani su grafikoni greške u funkciji broja ciklusa obuke za različite slučajeve. Rezultati obuke sumarno su u sažetoj formi prikazani u tabeli 18.

Tabela 18. Rezultati obuke neuronskih mreža korišćenjem rezultata fizičkog eksperimenta, za slučaj kada izlaz mreže predstavlja empirijski korekcionni faktor λ_{NET}

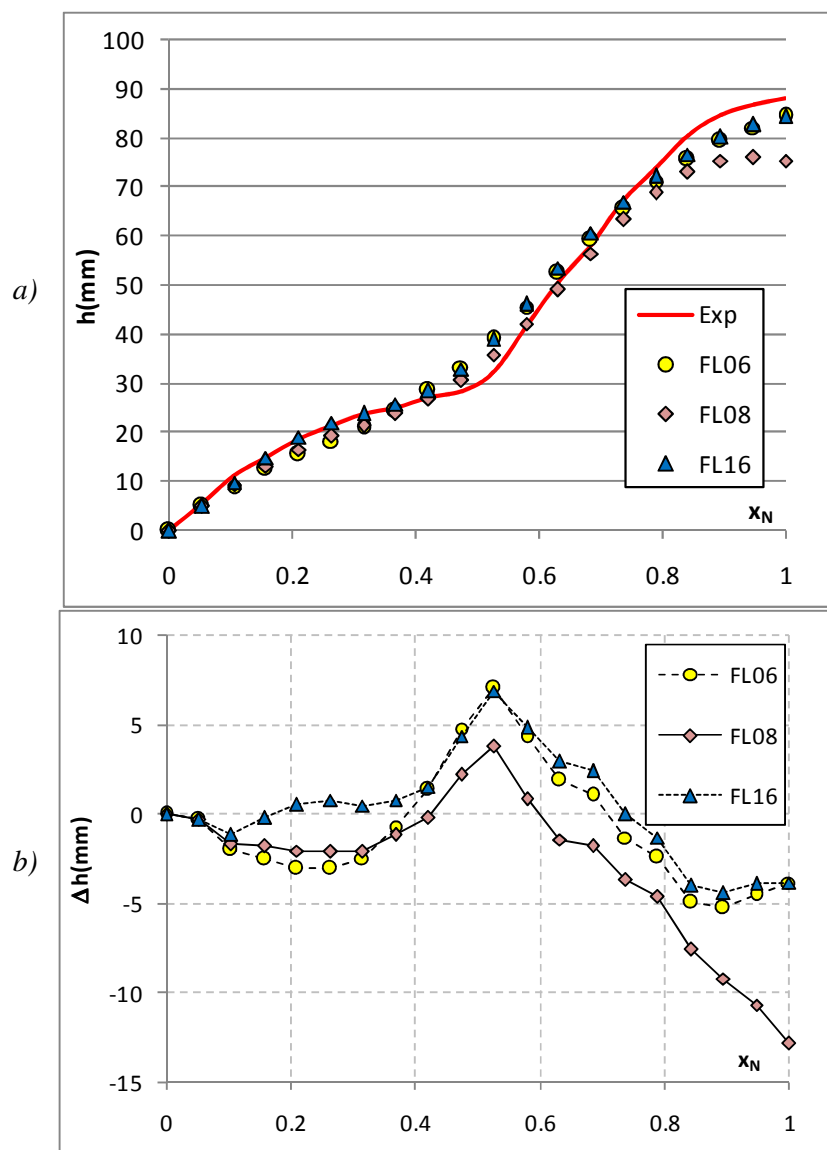
Broj neurona u skrivenom sloju	Najbolja postignuta tačnost (minimum kumulativne greške seta za kontrolu)	Broj sprovedenih ciklusa obuke
6	≈ 0.095	100000
8	≈ 0.08	1,200,000
12	Manji stepen tačnosti (≥ 0.1)	
16	≈ 0.085	300000

Kako se vidi iz rezultata prikazanih u tabeli 18, nagoveštena je najbolja sposobnost generalizacije za slučaj mreže sa 8 skrivenih neurona. Od interesa je zapaziti da je pri povećanju broja skrivenih neurona sa 8 na 12 došlo do narušavanja performansi neuronske mreže, da bi sa daljim povećanjem sa 12 na 16 performanse ponovo porasle. Ovo navodi na zaključak da pravac promene broja skrivenih neurona (povećanje ili smanjenje) nije uvek jednoznačno povezan sa pravcem promene (rast ili pad) kvaliteta predviđanja mreže. Iz tabele 18 takođe se, međutim, može uočiti da se vrednosti postignutih nivoa greške setova podataka za kontrolu sposobnosti generalizacije za sve ispitivane konfiguracije neuronskih mreža međusobno relativno malo razlikuju. Stoga je i u ovom slučaju, kao i u prethodnom, neophodno sprovesti komparativnu analizu karakteristika obučanih mreža na primerima simulacija za raspoložive setove podataka koji nisu bili korišćeni u procesu

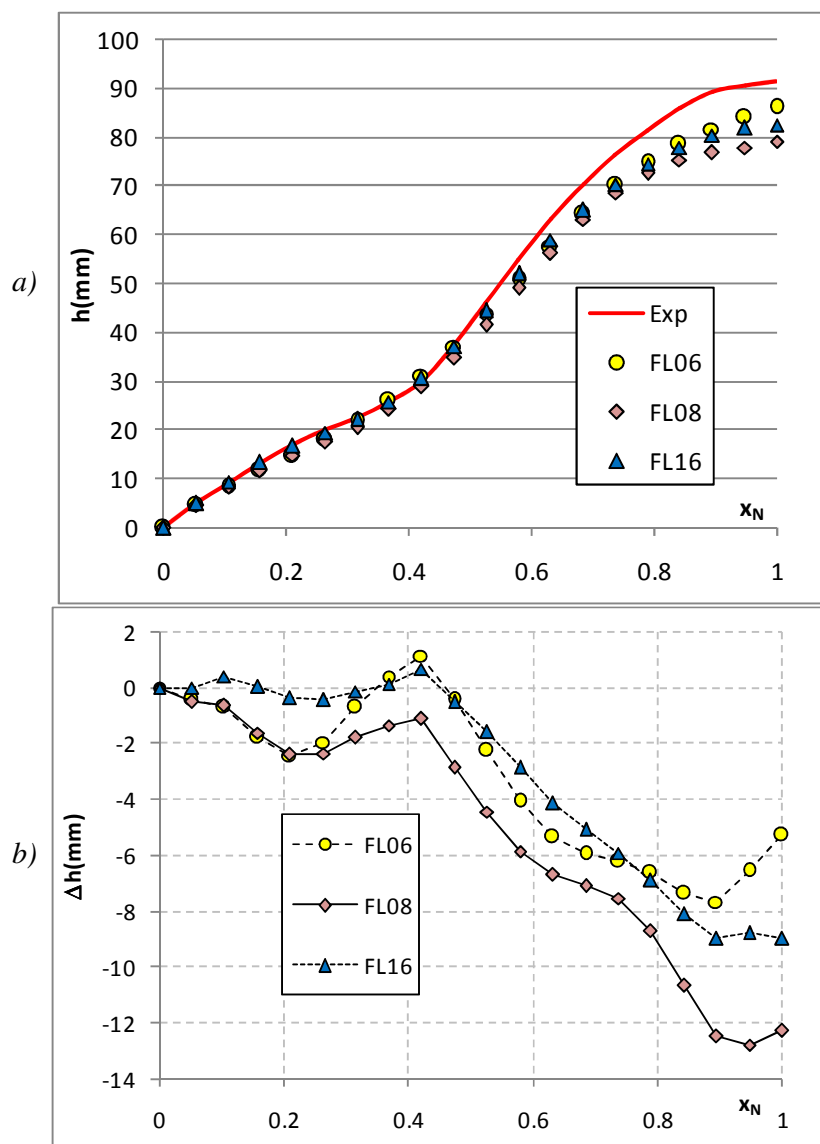
¹⁵ Odnosno normirana vrednost ovog parametra

obuke. Samo na taj način moguće je vrednovati kvalitativne i kvantitativne performanse modela i doneti zaključak o optimalnom izboru.

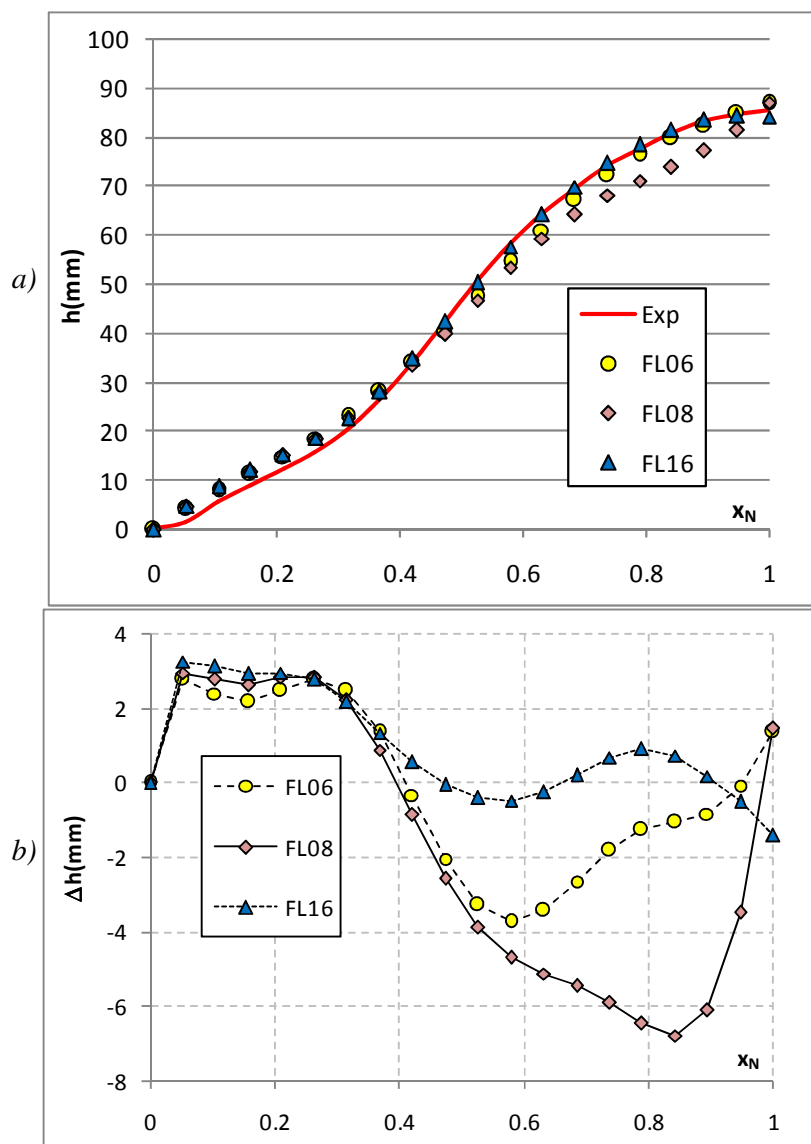
U nastavku su na slikama 85, 86 i 87 prikazani karakteristični primeri rezultata obuke neuronskih mreža za iste setove podataka kao i u prethodnoj tački, tj. "F", "L" i "R" (oznake prema tabeli 12, tačka 7.6.2). Shodno prethodnoj tački, prikaz rezultata obuhvata poređenje rezultata simulacije sa osrednjenim rezultatima merenja, za slučaj tri navedene konfiguracije neuronskih mreža (6, 8 odn. 16 neurona u skrivenom sloju). Pored toga, takođe su prikazani i dijagrami apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih osrednjenih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima.



Slika 85. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "F" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 16 neurona u skrivenom sloju (krive "FL06", "FL08" i "FL16" respektivno) sa osrednjenim rezultatima eksperimentalnih merenja (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih osrednjenih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 86. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "L" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 16 neurona u skrivenom sloju (krive "FL06", "FL08" i "FL16" respektivno) sa osrednjenim rezultatima eksperimentalnih merenja (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih osrednjenih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 87. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "R" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 16 neurona u skrivenom sloju (krive "FL06", "FL08" i "FL16" respektivno) sa osrednjenim rezultatima eksperimentalnih merenja (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih osrednjenih vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja

Prikazani rezultati, kao i u prethodnom slučaju, iskazuju relativno mala odstupanja modela od mernih rezultata. Vrednosti srednje kvadratne greške prikazane su u tabeli 19, na isti način kako je to dato i u prethodnoj tački.

Tabela 19. Vrednosti srednje kvadratne greške neuronskih mreža za različite setove podataka

Oznaka seta podataka (prema tabelama 12 i 13)		Broj neurona u skrivenom sloju		
		6	8	16
		Srednja kvadratna greška[mm]		
Setovi podataka korišćenih za testiranje VNM	F	3.46	5.13	3.05
	L	4.40	6.85	4.81
	R	2.25	4.10	1.73
	P30	0.98	2.11	6.27
Setovi podataka korišćenih za kontrolu sposobnosti generalizacije	C	6.47	7.07	2.32
	I	1.99	2.59	1.98
	O	0.90	2.27	1.53
	U	3.59	3.23	4.82
	P60	1.39	3.31	3.11
Setovi podataka korišćenih za obuku VNM	E	2.58	2.51	1.71
	J	1.91	2.73	1.56
	N	1.95	2.85	1.94
	T	3.72	2.80	1.67
	P40	1.92	1.17	0.38
Suma vrednosti srednje kvadratne greške		37.53	48.73	36.89
Aritmetička sredina vrednosti sr. kv. greške		2.68	3.48	2.64

Gore prikazani rezultati pokazuju da, sa stanovišta tačnosti predviđanja, konfiguraciju sa 8 skrivenih neurona treba isključiti iz daljeg razmatranja, odnosno treba napraviti izbor između konfiguracije sa 6 odnosno 16 skrivenih neurona. Po pitanju performansi, prikazani rezultati pokazuju neznatno bolje performanse za konfiguraciju sa 16 neurona. Kako je, međutim, razlika između posmatranih konfiguracija u smislu performansi minimalna, preporučuje se davanje prednosti konfiguraciji sa 6 skrivenih neurona zbog jednostavnije strukture i veće brzine izvršavanja modela.

Zaključak: između ispitanih konfiguracija za dati slučaj (obuka neuronske mreže na čijem izlazu se nalazi empirijski faktor λ_{NET} , zasnovana na empirijskim podacima dobijenih fizičkim eksperimentom), kao optimalna konfiguracija bira se neuronska mreža sa 6 neurona u jednom skrivenom sloju.

8.5.4 FORMIRANJE MODELA NA BAZI REZULTATA VIRTUELNOG EKSPERIMENTA

Obuka za slučaj kada izlaz mreže predstavlja visina efektivnog mikroprofila h_{EF}

Kratak rezime rezultata obuke pri različitim konfiguracijama neuronske mreže i ponavljanju obuke pri različitim vrednostima faktora α prikazan je u tabeli 20. Kao i u

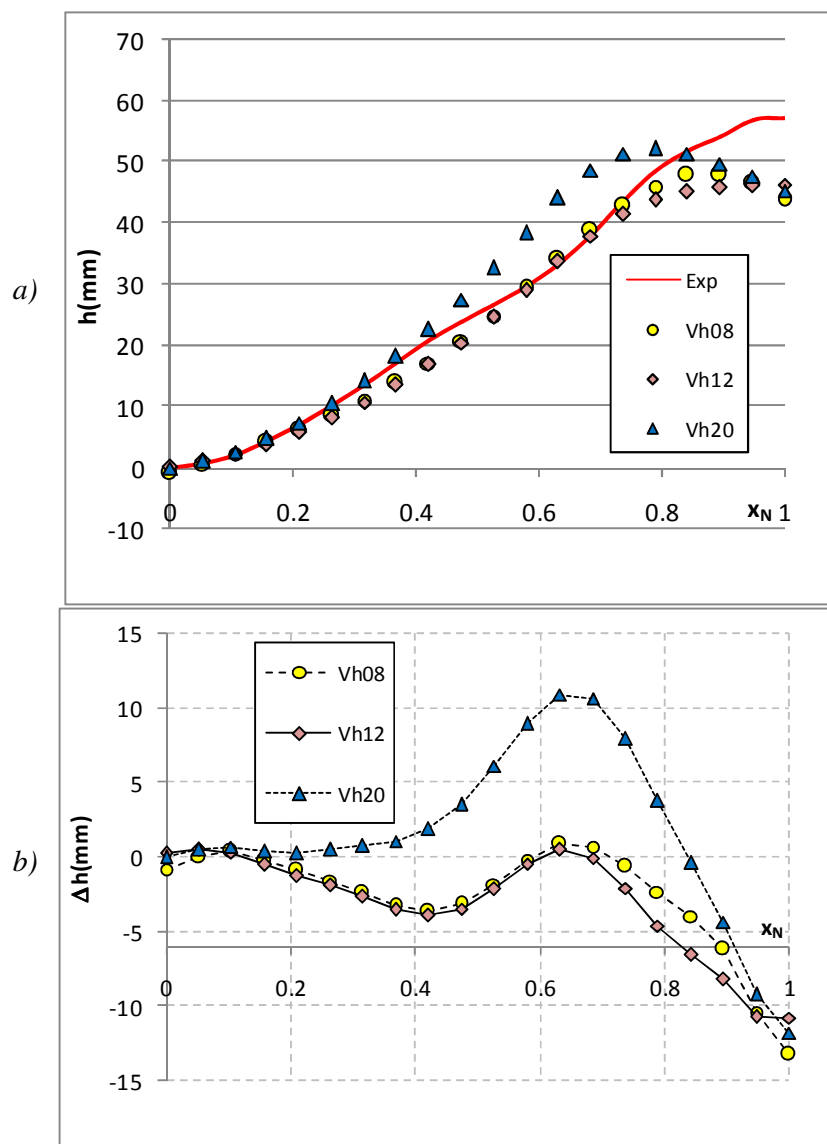
prethodnim slučajevima, prikaz grafikona greške setova podataka za obuku i za kontrolu sposobnosti generalizacije u zavisnosti od broja ciklusa učenja je dat na priloženom CD-ROM-u.

Tabela 20. Rezultati obuke neuronskih mreža korišćenjem rezultata virtuelnog eksperimenta, za slučaj kada izlaz mreže predstavlja eksplicitna vrednost visine efektivnog mikroprofila h_{EF}

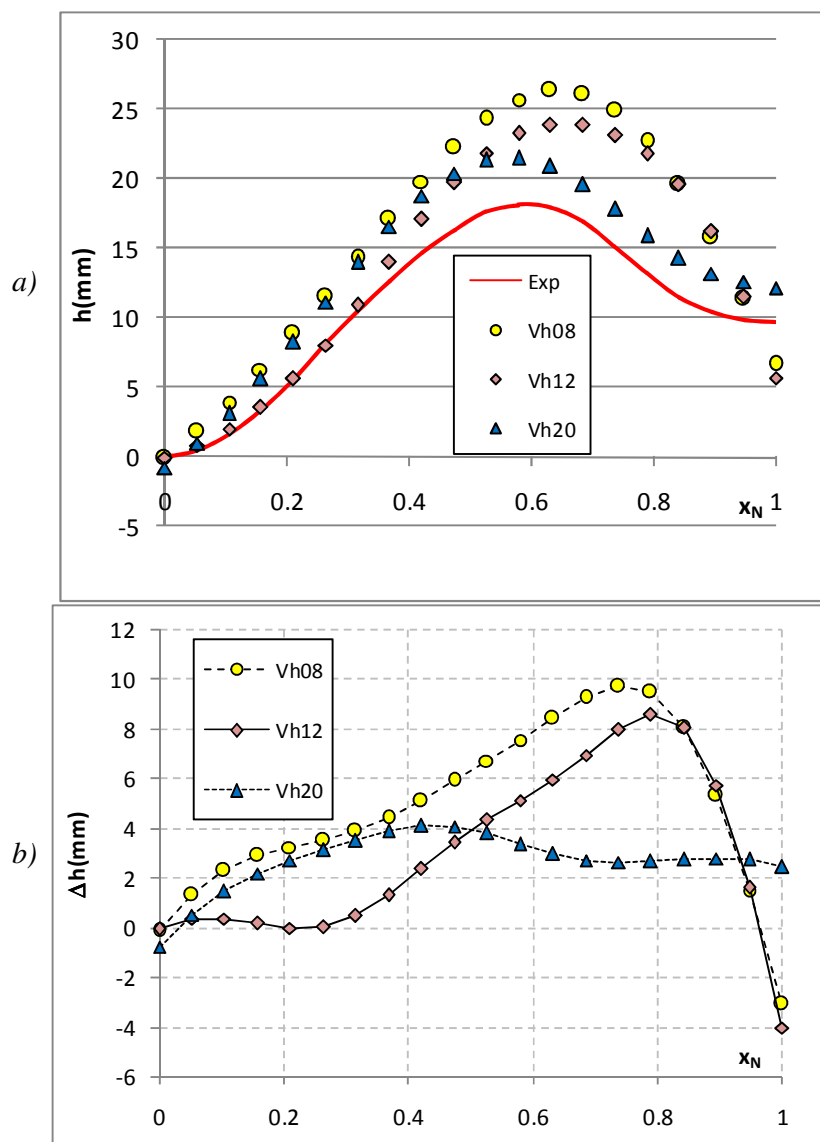
Broj neurona u skrivenom sloju	Najbolja postignuta tačnost (minimum kumulativne greške seta za kontrolu)	Broj sprovedenih ciklusa obuke
6	≈ 0.12	100000
8	≈ 0.04	100000
12	≈ 0.03	500000
16	Postignut manji stepen tačnosti	
20	≈ 0.03	800000

Prema tabeli 20, a u skladu sa pristupom korišćenim u prethodnim tačkama, neophodno je sprovođenjem simulacija uporediti performanse mreža sa 8, 12 i 20 neurona u skrivenom sloju. U slučaju mreže sa 16 skrivenih neurona došlo je do povećanja greške kontrolnog seta podataka u odnosu na slučaj sa 12 skrivenih neurona, pa ova konfiguracija dalje nije razmatrana. Takođe nije razmatrana ni konfiguracija sa 6 skrivenih neurona s obzirom na to da je u ovom slučaju iskazana značajno veća greška kontrolnog seta podataka nego u preostalim slučajevima. Rezultati simulacija pokazali su, između ostalog, znatno lošije performanse u pogledu generalizacije nego u slučaju obuke neuronskih mreža na bazi rezultata fizičkog eksperimenta opisanog u prethodnoj tački, što će biti diskutovano u nastavku rada. Prema rezultatima prikazanim u tabeli 20, moguće je očekivati da bi dalje povećanje broja skrivenih neurona moglo da dovede do daljeg poboljšanja performansi neuronske mreže za posmatrani slučaj. Međutim, prema svim ostalim rezultatima iskazanim tokom procesa obuke neuronskih mreža za različite slučajeve, procenjeno je da potencijali za dalje poboljšanje ipak nisu suštinski. Zbog toga, kako bi obim izvršenih aktivnosti bio u prihvatljivom odnosu sa očekivanim rezultatima, dalje povećanje broja skrivenih neurona nije vršeno.

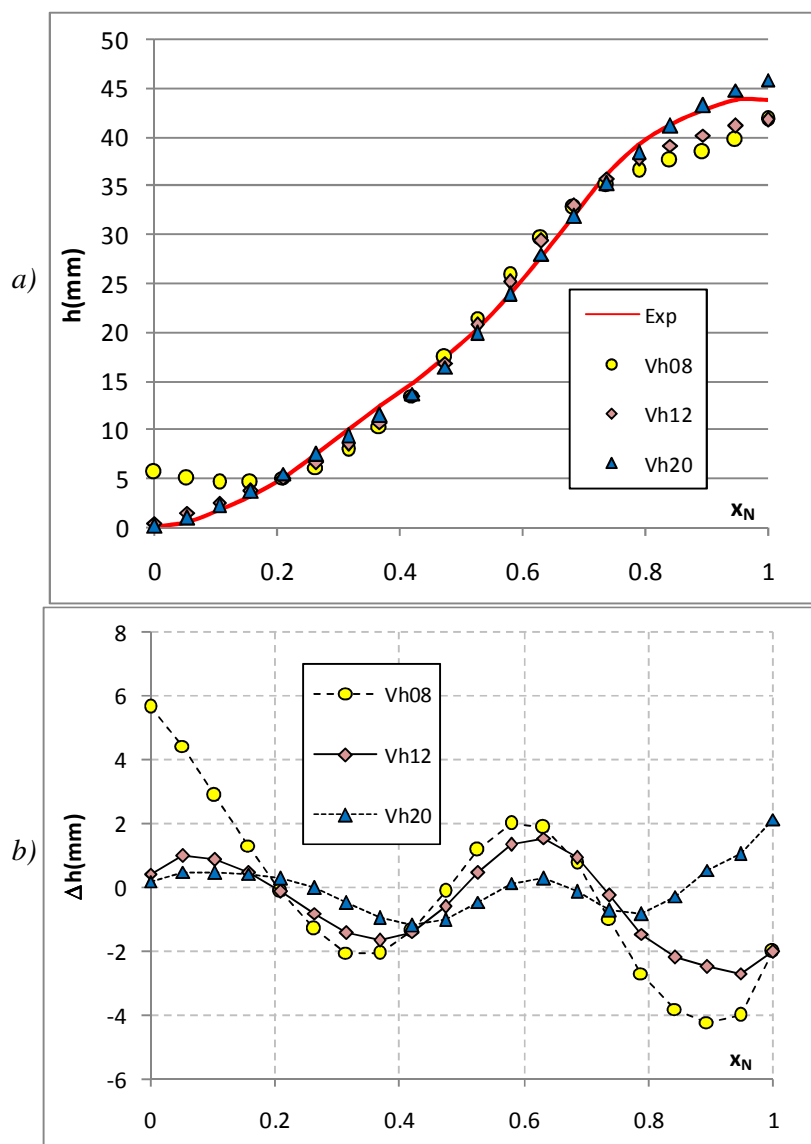
U nastavku su na slikama 88, 89 i 90 prikazani karakteristični primeri rezultata obuke neuronskih mreža za setove podataka "15", "27" i "39" (oznake prema tabeli 15, tačka 7.7.6). Prikaz rezultata obuhvata poređenje rezultata neuronskih mreža sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (međuradijalni model, tačka 7.7), za slučaj tri navedene konfiguracije neuronskih mreža (8, 12 odn. 20 neurona u skrivenom sloju). Pored toga, takođe su prikazani i dijagrami apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentima sa međuradijalnim modelom.



Slika 88. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "15" dobijenih neuronskim mrežama sa 8, 12 i 20 neurona u skrivenom sloju (krive "Vh08", "Vh12" i "Vh20" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 89. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija:
 a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "27" dobijenih neuronskim mrežama sa 8, 12 i 20 neurona u skrivenom sloju (krive "Vh08", "Vh12" i "Vh20" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp");
 b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 90. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija:
 a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "39" dobijenih neuronskim mrežama sa 8, 12 i 20 neurona u skrivenom sloju (krive "Vh08", "Vh12" i "Vh20" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja

Vrednosti srednje kvadratne greške, određene na isti način kao u prethodnim tačkama, prikazane su u tabeli 21.

Tabela 21. Vrednosti srednje kvadratne greške neuronskih mreža za različite setove podataka

Oznaka seta podataka (prema tabeli 15)		Broj neurona u skrivenom sloju		
		8	12	20
		Srednja kvadratna greška[mm]		
Setovi podataka korišćenih za testiranje VNM	15	4.52	4.70	6.03
	27	5.99	4.60	2.99
	39	2.75	1.44	0.79
	51	3.39	1.70	1.84
	63	1.37	1.28	0.80
Setovi podataka korišćenih za kontrolu sposobnosti generalizacije	36	2.04	2.82	5.13
	48	1.09	1.55	1.59
	72	2.28	1.39	0.98
	94	3.05	2.39	0.93
Setovi podataka korišćenih za obuku VNM	46	4.60	2.93	1.66
	56	2.23	1.88	0.73
	86	1.58	1.42	1.15
Suma vrednosti srednje kvadratne greške		34.87	28.11	24.61
Aritmetička sredina vrednosti sr. kv. greške		2.91	2.34	2.05

Sa dijagramskih prikaza rezultata u pojedinim slučajevima uočljivo je delimično do potpuno odsustvo slaganja sa rezultatima merenja, što ukazuje na neadekvatne performanse modela. Sa stanovišta tačnosti predviđanja, najbolje rezultate ispoljava konfiguracija sa 20 skrivenih neurona, iako npr. u slučaju seta "15" (slika 88) upravo ova konfiguracija pokazuje najveća odstupanja, što ukazuje na to da optimalni izbor konfiguracije u datim okolnostima nije jednoznačan.

Zaključak: između ispitanih konfiguracija za dati slučaj (obuka neuronske mreže na čijem izlazu se nalazi visina efektivnog mikroprofila h_{EF} , zasnovana na empirijskim podacima dobijenim virtuelnim eksperimentom – simulacijom sa korišćenjem modela pneumatika sa radijalnim i međuradijalnim oprugama), kao optimalna konfiguracija bira se neuronska mreža sa 20 neurona u jednom skrivenom sloju.

Obuka za slučaj kada izlaz mreže predstavlja empirijski faktor λ_{NET}

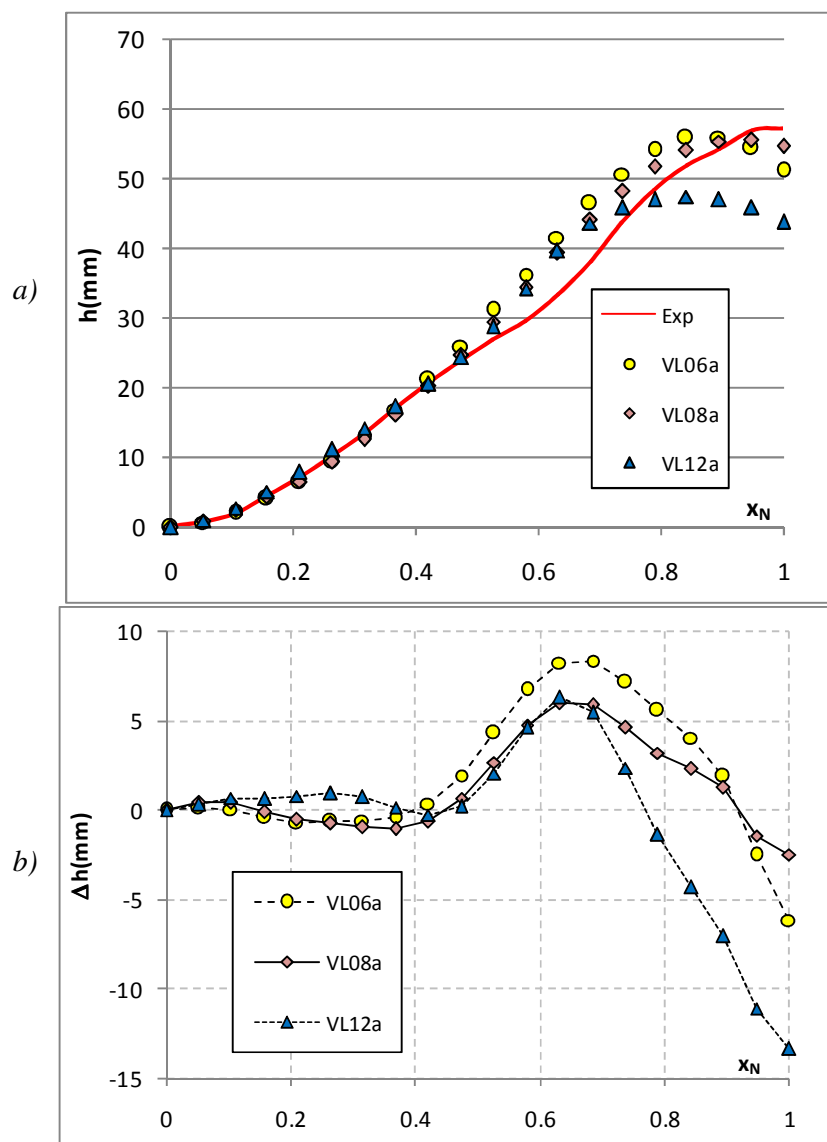
Kratak rezime rezultata obuke pri različitim konfiguracijama neuronske mreže i ponavljanju obuke pri različitim vrednostima faktora α prikazan je u tabeli 22. Prikaz grafikona greške setova podataka za obuku i za kontrolu sposobnosti generalizacije u zavisnosti od broja ciklusa učenja je dat na priloženom CD-ROM-u.

Tabela 22. Rezultati obuke neuronskih mreža korišćenjem rezultata virtuelnog eksperimenta, za slučaj kada izlaz mreže predstavlja empirijski korekcionni faktor λ_{NET}

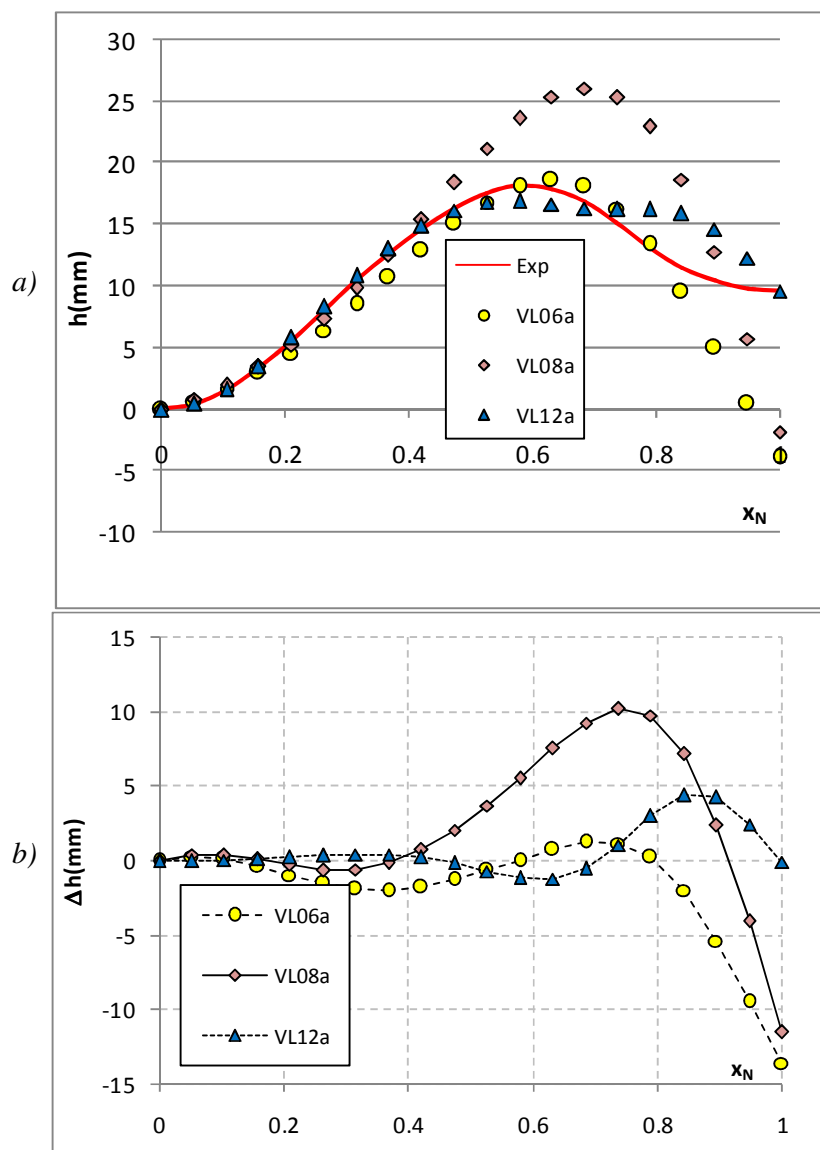
Broj skrivenih neurona	Najbolja postignuta tačnost (minimum kumulativne greške seta za kontrolu)	Broj sprovedenih ciklusa obuke
6	0.07	100000
8	0.045	400000
12	0.01	300000
16	0.01	600000

U tabeli 22 može se uočiti da se sa konfiguracijom sa 12 skrivenih neurona došlo do geške značajno manje u odnosu na sve ostale konfiguracije, i to ne samo u odnosu na posmatrani slučaj već i u odnosu na ostale obrađene slučajeve. Kako je ovakav ishod ponovljen sa konfiguracijom sa 16 skrivenih neurona, njihov broj nije dalje povećavan.

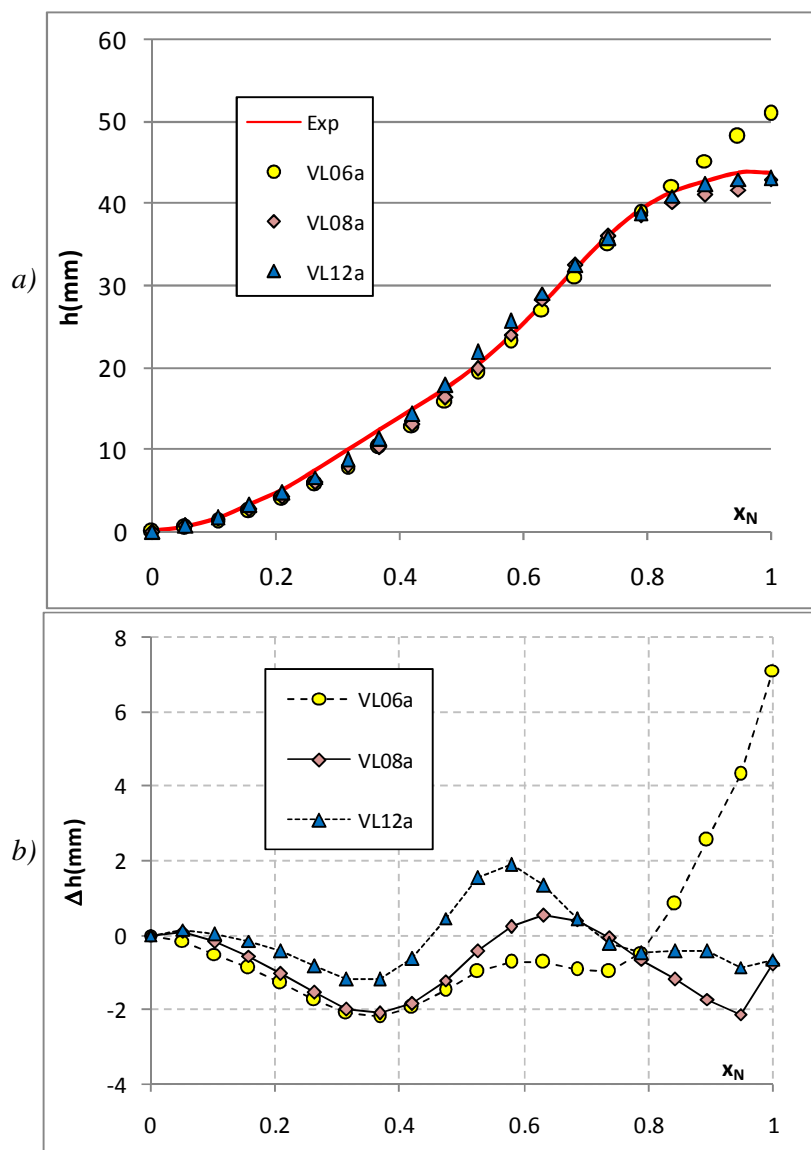
U nastavku su na slikama 91, 92 i 93 prikazani karakteristični primeri rezultata obuke neuronskih mreža za iste setove podataka kao i u prethodnoj tački, tj. "15", "27" i "39" (oznake prema tabeli 15, tačka 7.7.6). Kao i u prethodnim slučajevima, prikaz rezultata obuhvata poređenje rezultata simulacije sa rezultatima virtuelnog eksperimenta, za slučaj tri navedene konfiguracije neuronskih mreža (6, 8 odn. 12 neurona u skrivenom sloju). Pored toga, takođe su prikazani i dijagrami apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentima.



Slika 91. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "15" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "VL06a", "VL08a" i "VL12a" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 92. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "27" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "VL06a", "VL08a" i "VL12a" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 93. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "39" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "VL06a", "VL08a" i "VL12a" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja

Vrednosti srednje kvadratne greške, određene na isti način kao u prethodnim tačkama, prikazane su u tabeli 23.

Tabela 23. Vrednosti srednje kvadratne greške neuronskih mreža za različite setove podataka

Oznaka seta podataka (prema tabeli 15)		Broj neurona u skrivenom sloju		
		6	8	12
		Srednja kvadratna greška[mm]		
Setovi podataka korišćenih za testiranje VNM	15	4.30	2.82	5.00
	27	4.15	5.60	1.74
	39	2.31	1.21	0.86
	51	3.35	1.89	1.31
	63	1.02	0.97	2.03
Setovi podataka korišćenih za kontrolu sposobnosti generalizacije	36	10.41	7.40	1.63
	48	3.47	3.78	2.17
	72	1.45	1.64	1.13
	94	4.73	2.52	1.00
Setovi podataka korišćenih za obuku VNM	46	5.07	3.89	1.79
	56	1.45	1.62	1.09
	86	3.01	2.73	2.00
Suma vrednosti srednje kvadratne greške		44.72	36.08	21.76
Aritmetička sredina vrednosti sr. kv. greške		3.73	3.01	1.81

Postignuti rezultati su slični kao u prethodnom slučaju, osim što su zahvaljujući upotrebi empirijskog korekcionog faktora λ_{NET} izbegnuta odstupanja u nultom položaju. Step en slaganja sa referentnim rezultatima virtuelnog eksperimenta je generalno manji nego u slučaju fizičkog eksperimenta. Sa stanovišta tačnosti neuronskih mreža, rezultati prikazani u tabeli 23 ukazuju na najveću tačnost mreže sa 12 skrivenih neurona, što je u skladu sa očekivanjima iznetim na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 22. Grafički prikaz rezultata na slikama Slika 91, Slika 92 i Slika 93 takođe potvrđuje izneti zaključak u smislu međusobnog poređenja neuronskih mreža.

Zaključak: između ispitanih konfiguracija za dati slučaj (obuka neuronske mreže na čijem izlazu se nalazi empirijski korektivni faktor λ_{NET} , zasnovana na empirijskim podacima dobijenim virtuelnim eksperimentom – simulacijom sa korišćenjem modela pneumatika sa radijalnim i međuradijalnim oprugama), kao optimalna konfiguracija bira se neuronska mreža sa 12 neurona u jednom skrivenom sloju.

8.5.5 SLUČAJ OBUKE NEURONSKE MREŽE ZA NEPROMENLJIVU GEOMETRIJU PREPREKE

U prethodnoj tački izvršen je razvoj empirijskog modela zasnovan na neuronskoj mreži za nekoliko različitih slučajeva sa aspekta setova empirijskih podataka i vrste podatka na izlazu modela. Za sve ove slučajeve karakteristično je da se nastojalo da se u performanse modela inkorporira svojstvo generalizacije odziva za pravougaonu prepreku širokog

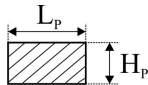
spektra dimenzija poprečnog preseka (dužine i visine). Ovakav pristup je izabran kao preliminarno-istraživački, s obzirom na to da je jedna od ideja za dalje pravce istraživanja razvoj modela koji bi mogao da se koristi na podlozi čije su geometrijske karakteristike opšteg tj. proizvoljnog karaktera. U tom kontekstu procenjeno je da je prikladno nastojanje da se model formira tako da zadovolji kriterijum o proizvoljnim dimenzijama pravougaonog poprečnog preseka prepreke.

U praksi, međutim, kada se za ispitivanje koriste singularne prepreke pravilnog poprečnog preseka, broj različitih prepreka u smislu forme i dimenzija poprečnog preseka obično je ograničen na svega nekoliko kombinacija visine i dužine pravougaonika. Ova praksa, sa jedne strane, omogućava da se potreban angažman i neophodni materijalni resursi pri eksperimentalnom radu zadrže u prihvatljivim granicama. Sa druge strane, i sa korišćenjem relativno malog broja različitih prepreka (ili čak samo jedne) moguće je da se dobije dovoljno širok spektar eksperimentalnih podataka. Ovo se može postići, na primer, različitim prostornim konfiguracijama postavljanja prepreka na podlogu. Primeri ovog pristupa zastupljeni su u jednom broju publikacija kao npr. [73], [98], [11], [78] i dr.

Imajući ovo u vidu, može se zaključiti da postoji opravdanje za razvojem empirijskog modela kod koga neće biti prisutan zahtev za generalizacijom u smislu dimenzija podloge, već koji će u obzir uzeti samo mali broj (u graničnom slučaju, samo jednu) varijanti geometrije prepreke korišćen u okviru predmetnog ispitivanja. Pri tome je i dalje bitno da model zadrži svojstvo prilagođavanja mehanizma geometrijskog filtriranja trenutnom radnom režimu iskazanom kroz tekuću vrednost vertikalne reakcije odnosno kontaktne dužine. Ove veličine, podložne promenama usled dinamičkih fluktuacija, utiču na karakter odziva modela, što je bitno uzeti u obzir, kako je pokazano u tačkama 7.3, 7.4 i 7.5.

Shodno navedenom, u okviru ove tačke izvršen je razvoj modela čiji odziv opisuje odziv pneumatika pri kvazistatičkom kotrljanju preko prepreke fiksne geometrije ali pri promenljivom vertikalnom opterećenju. Karakteristike procesa formiranja modela sumirane su u okviru tabele 24.

Tabela 24. Karakteristike procesa formiranja modela za fiksnu geometriju prepreke

<p>Označavanje veštačkih neuronskih mreža:</p> <ul style="list-style-type: none"> • izlaz: eksplicitna vrednost $h_{EF} \Rightarrow "h_{xx}"$ • izlaz: korekcionni faktor $\lambda_{NET} \Rightarrow "L_{xx}"$ <p>(xx = broj neurona u skrivenom sloju)</p>
<p>Parametar radnog režima: vertikalna reakcija podloge G_T (normirana vrednost)</p> <p>Opseg parametra: $G_T = 0 \div 20.000 N$</p>
<p>Dobijanje seta empirijskih podataka: pomoću virtuelnog eksperimenta – simulacije sa modelom pneumatika sa radijalnim i međuradijalnim oprugama (tačka 7.7)</p>
<p>Dimenzije poprečnog preseka prepreke: $L_p \times H_p = 200 \times 50$ (mm)</p> 

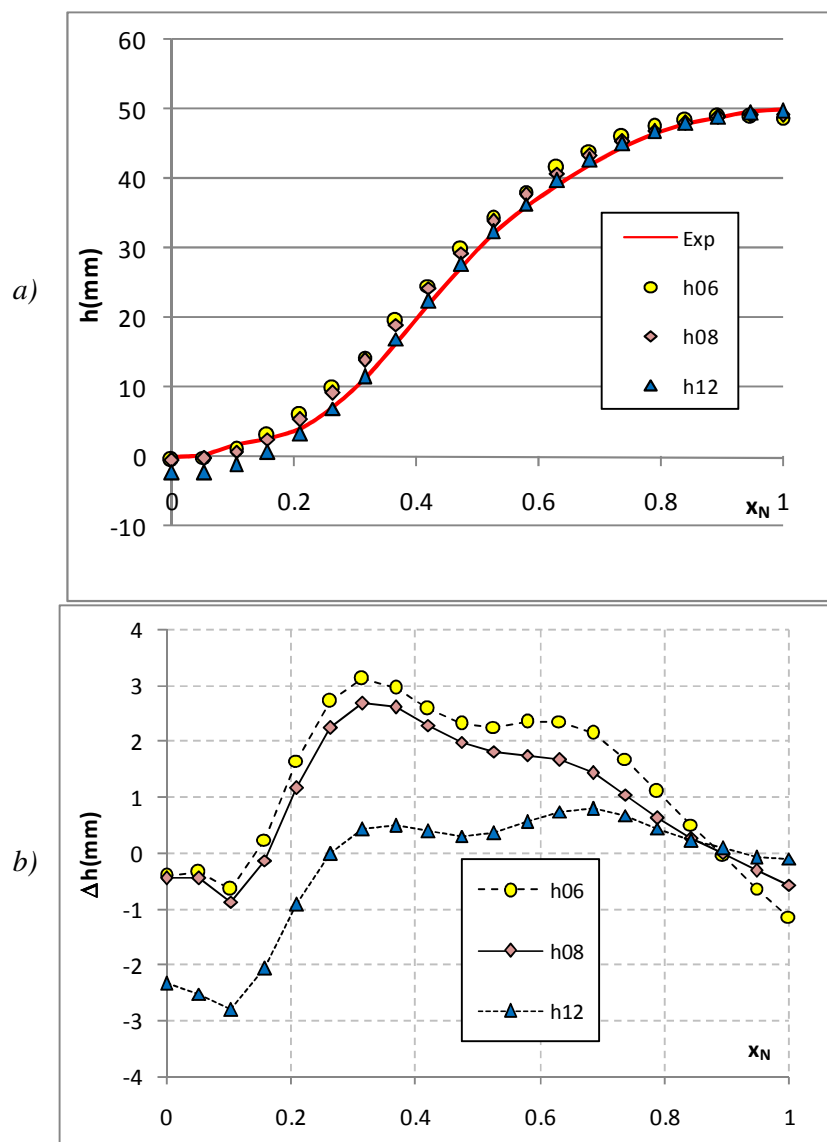
Sa aspekta načina zadavanja ulaznik podataka zadržana je ista konfiguracija neuronske mreže koja je korišćena u prethodnim tačkama. To znači da su ulazni parametri redom:

- normirani položaj točka x_N ;
- pokazatelj radnog režima – vertikalna reakcija podloge G_T ;
- dužina prepreke L_p ;
- visina prepreke H_p .

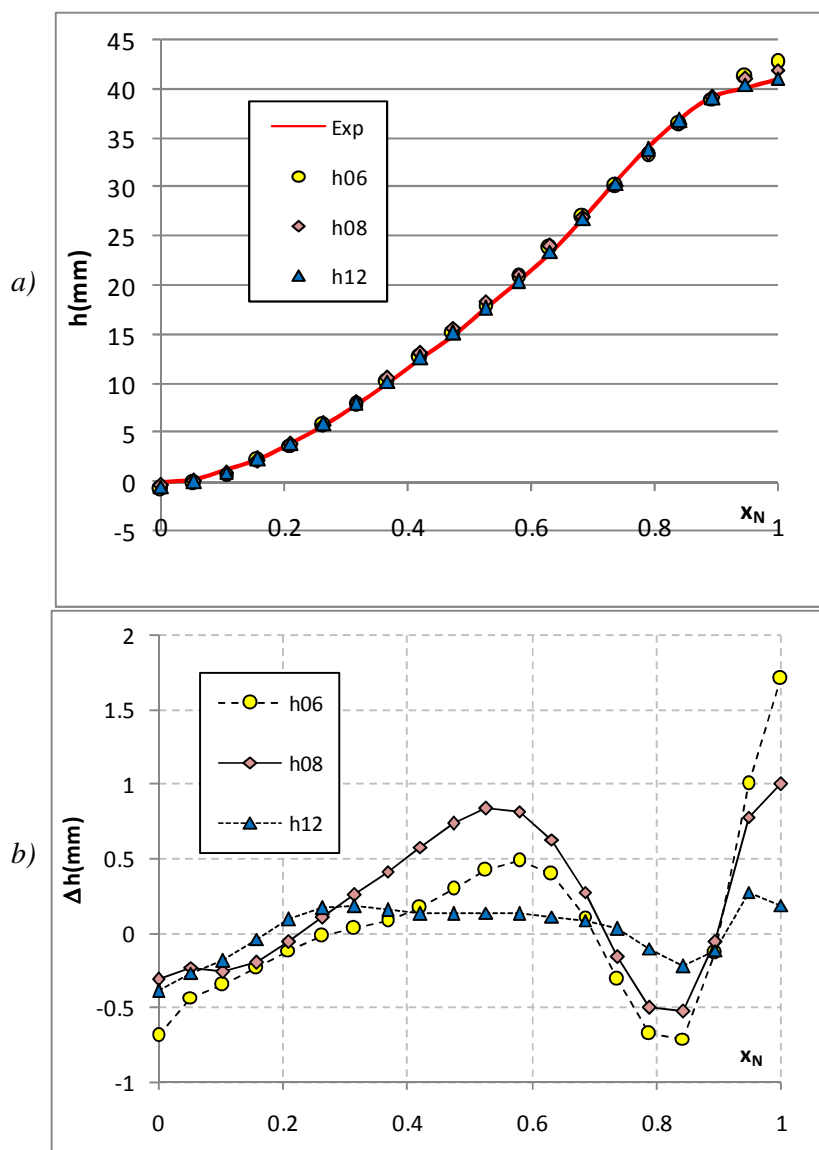
Kako se radi o obučavanju neuronske mreže za konstantne vrednosti L_p i H_p , ovi parametri su mogli da budu izostavljeni iz konfiguracije. Takva konfiguracija mreže je takođe isprobana, pri čemu rezultati nisu ispoljili vidljivu razliku pa je zbog opštosti u daljem radu zadržana prvobitna verzija.

Obuka za slučaj kada izlaz mreže predstavlja visina efektivnog mikroprofila h_{EF}

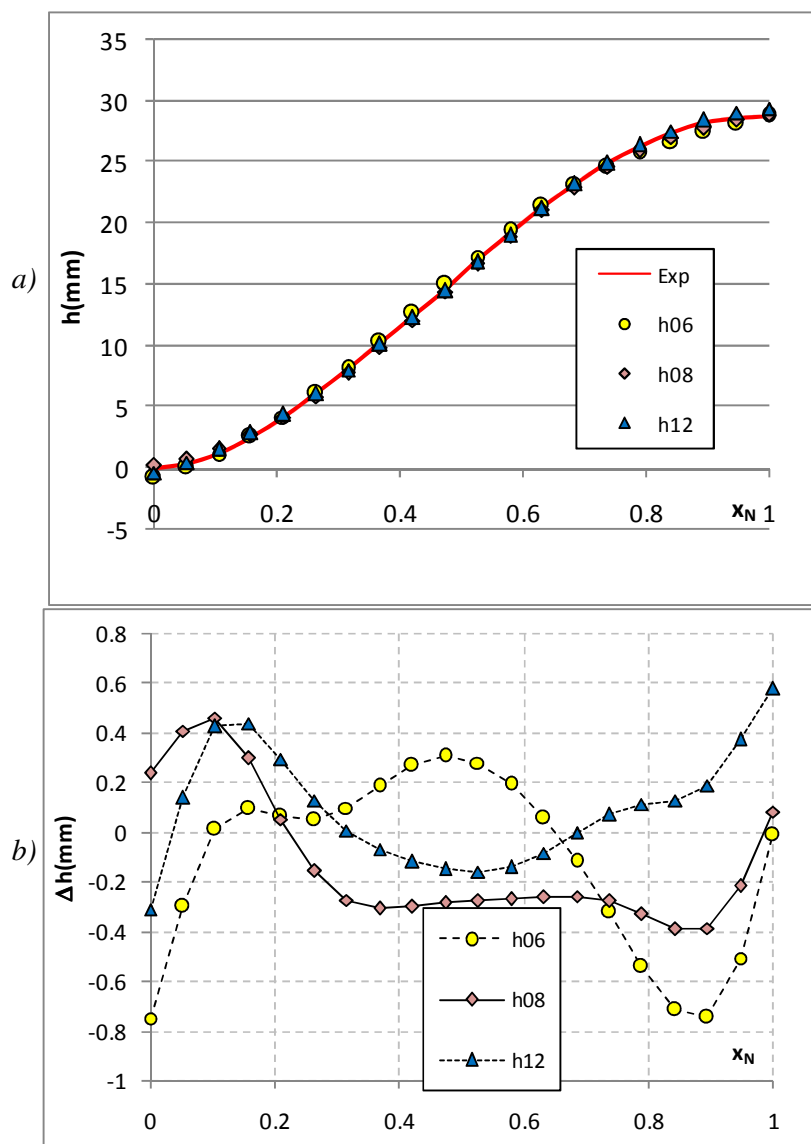
U nastavku su na slikama 94, 95 i 96 prikazani karakteristični primeri rezultata obuke neuronskih mreža za setove podataka "5", "17" i "11" koji nisu korišćeni pri obuci neuronskih mreža. Nivoi vertikalnog opterećenja točka odgovaraju vrednostima za navedene setove podataka kako je to prikazano tabeli 15, tačka 7.7.6. Prikaz rezultata obuhvata poređenje rezultata simulacije sa rezultatima virtuelnog eksperimenta, za slučaj tri navedene konfiguracije neuronskih mreža (6, 8 odn. 12 neurona u skrivenom sloju). Pored toga, takođe su prikazani i dijagrami apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentima.



Slika 94. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "5" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "h06", "h08" i "h12" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 95. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "11" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "h06", "h08" i "h12" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 96. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "17" dobijenih neuronskim mrežama sa 6, 8 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "h06", "h08" i "h12" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja

Vrednosti srednje kvadratne greške, određene na isti način kao u prethodnim tačkama, prikazane su u tabeli 25.

Tabela 25. Vrednosti srednje kvadratne greške neuronskih mreža za različite setove podataka

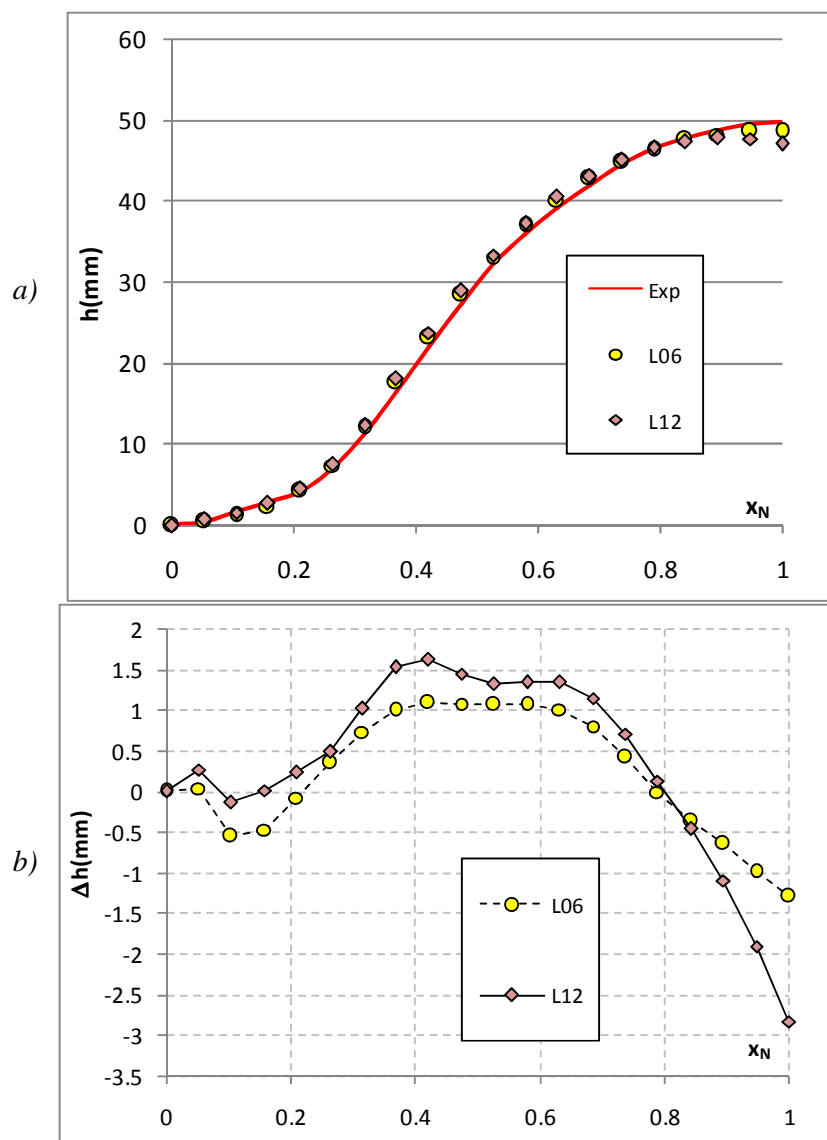
Oznaka seta podataka (prema tabeli 15)		Broj neurona u skrivenom sloju		
		6	8	12
		Srednja kvadratna greška[mm]		
Setovi podataka korišćenih za testiranje VNM	5	1.89	1.52	1.21
	11	0.59	0.53	0.18
	17	0.38	0.30	0.25
Setovi podataka korišćenih za kontrolu sposobnosti generalizacije	2	0.90	0.78	1.20
	8	0.48	0.35	0.72
	14	0.71	0.51	0.24
	20	0.27	0.30	0.35
Setovi podataka korišćenih za obuku VNM	3	1.36	1.28	1.05
	9	0.49	0.27	0.46
	18	0.34	0.35	0.26
Suma vrednosti srednje kvadratne greške		7.40	6.20	5.92
Aritmetička sredina vrednosti sr. kv. greške		0.74	0.62	0.59

Prikazani rezultati pokazuju da je u posmatranom slučaju, u poređenju sa prethodnim tačkama, postignut znatno viši stepen tačnosti modela. S obzirom na kvalitativnu saglasnost rezultata simulacije (slika 95), kao i na nivo srednje kvadratne greške (tabela 25), može se zaključiti da – među posmatranim konfiguracijama – najbolje rezultate postiže mreža sa 12 skrivenih neurona.

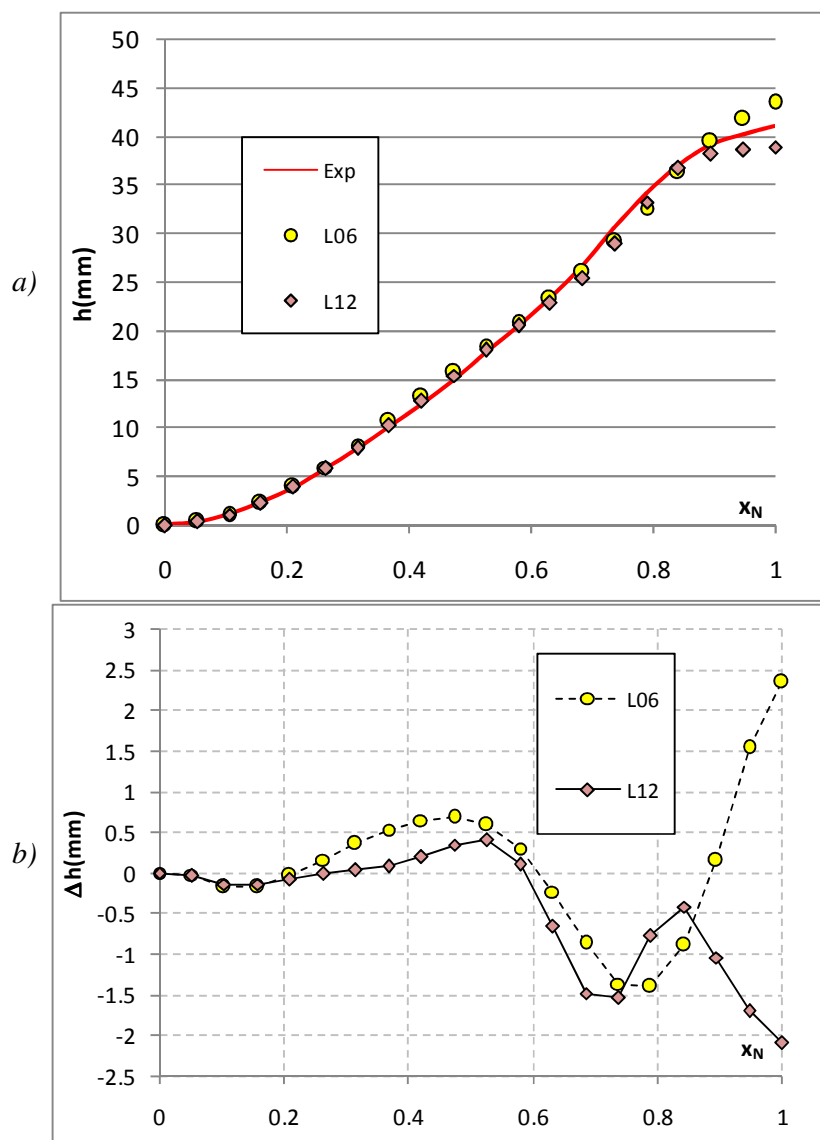
Zaključak: između ispitanih konfiguracija za dati slučaj (obuka neuronske mreže na čijem izlazu se nalazi visina efektivnog mikroprofila h_{EF} , zasnovana na rezultatima virtuelnog eksperimenta, za slučaj prepreke sa konstantnim geometrijskim parametrima), kao optimalna konfiguracija bira se neuronska mreža sa 12 neurona u jednom skrivenom sloju.

Obuka za slučaj kada izlaz mreže predstavlja empirijski faktor λ_{NET}

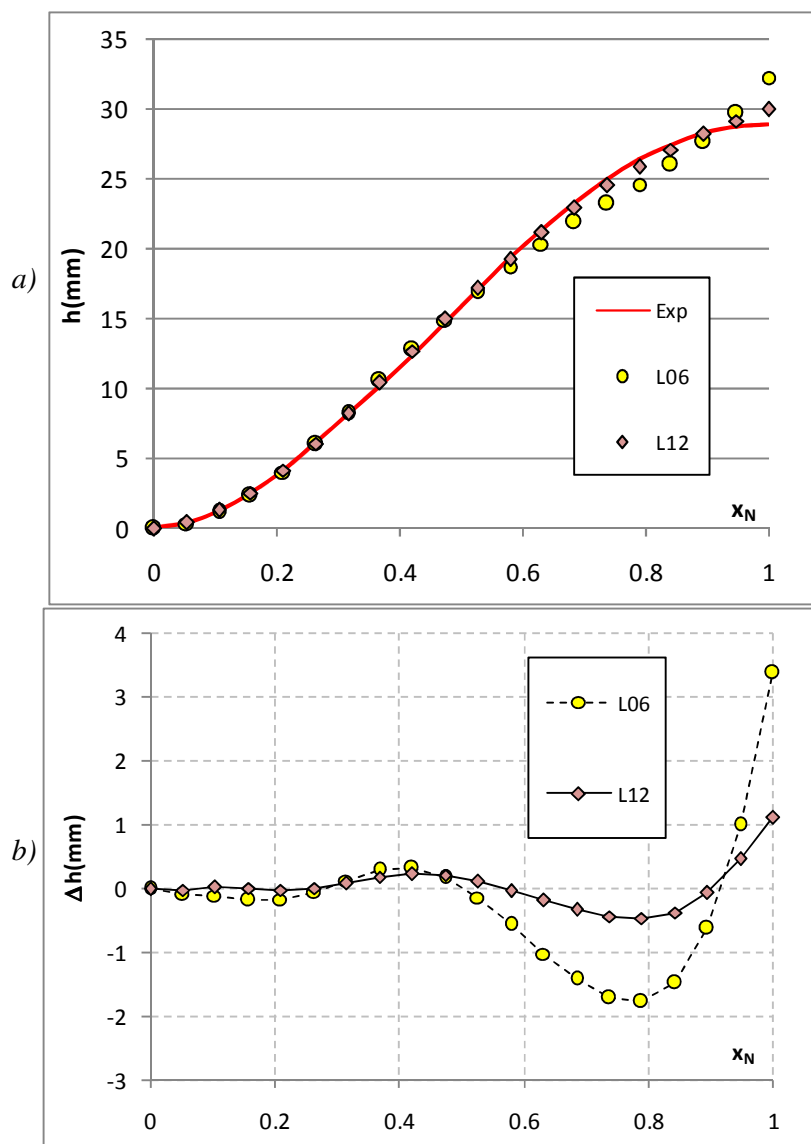
U nastavku su na slikama 97, 98 i 99 prikazani karakteristični primeri rezultata obuke neuronskih mreža za iste setove podataka kao i u prethodnoj tački tj. "5", "17" i "11" koji nisu korišćeni pri obuci neuronskih mreža. Obuka je vršena za dve konfiguracije neuronskih mreža, i to sa 6 odnosno 12 neurona u skrivenom sloju. Obuka je sprovedena prema istim principima i na isti način kako je opisano u prethodnim tačkama.



Slika 97. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija:
 a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "5" dobijenih neuronskim mrežama sa 6 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "L06" i "L12" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp");
 b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 98. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija: a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "11" dobijenih neuronskim mrežama sa 6 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "L06" i "L12" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp"); b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja



Slika 99. Uporedni prikaz performansi neuronskih mreža različitih konfiguracija:
 a) poređenje rezultata simulacije kvazistatičkog kotrljanja točka preko prepreke "17" dobijenih neuronskim mrežama sa 6 i 12 neurona u skrivenom sloju (krive "L06" i "L12" respektivno) sa rezultatima virtuelnog eksperimenta (kriva "Exp");
 b) vrednosti apsolutnih odstupanja rezultata dobijenih neuronskim mrežama od referentnih vrednosti dobijenih virtuelnim eksperimentom; x_N – normirana uzdužna koordinata, h – visina efektivnog mikroprofila, Δh – odstupanje između vrednosti dobijenih mrežom i rezultata merenja

Vrednosti srednje kvadratne greške, određene na isti način kao u prethodnim tačkama, prikazane su u tabeli 26.

Tabela 26. Vrednosti srednje kvadratne greške neuronskih mreža za različite setove podataka

Oznaka seta podataka (prema tabeli 15)	Broj neurona u skrivenom sloju		
	6	12	
	Srednja kvadratna greška [mm]		
Setovi podataka korišćenih za testiranje VNM	5	0.79	1.23
	11	0.89	0.87
	17	1.14	0.35
Setovi podataka korišćenih za kontrolu sposobnosti generalizacije	2	0.87	0.67
	8	0.58	0.44
	14	1.07	0.65
	20	0.56	0.22
Setovi podataka korišćenih za obuku VNM	3	0.77	0.85
	9	0.57	0.55
	18	0.89	0.24
Suma vrednosti srednje kvadratne greške	8.13	6.07	
Aritmetička sredina vrednosti sr. kv. greške	0.81	0.61	

Kao i u prethodnom slučaju, dobijeni rezultati ispoljavaju visok stepen tačnosti modela. Rezultati upoređivanja dve ispitane konfiguracije ukazuju na to da se bolje performanse modela kod neuronske mreže sa 12 skrivenih neurona.

Zaključak: od dve ispitane konfiguracije za dati slučaj (obuka neuronske mreže na čijem izlazu se nalazi empirijski korektivni faktor λ_{NET} , zasnovana na rezultatima virtuelnog eksperimenta, za slučaj prepreke sa konstantnim geometrijskim parametrima), kao optimalna konfiguracija bira se neuronska mreža sa 12 neurona u jednom skrivenom sloju.

8.5.6 ANALIZA REZULTATA OBUKE NEURONSKIH MREŽA

U prethodnom delu rada prikazan je postupak razvoja modela kvazistatičke envelope kretanja traktorskog točka zasnovan na veštačkim neuronskim mrežama, za slučaj kotrljanja točka preko singularne prepreke pravougaonog poprečnog preseka. S obzirom na to da razvoj ovakvog modela predstavlja novi pristup kakav ranije nije korišćen u literaturi, razvoj je izvršen za nekoliko karakterističnih slučajeva kako bi rezultati mogli da se međusobno uporede i donesu zaključci o daljim pravcima istraživačkog rada odnosno potencijalima za praktičnu primenu modela.

Jedan od ključnih pokazatelja performansi modela je tačnost predviđanja. Kao parametar koji može da posluži za analizu tačnosti usvojena je osrednjena vrednost srednje kvadratne greške predviđanja modela, čije su vrednosti navedene u tabelama 17, 19, 21, 23, 25 i 26. U tabeli 27 prikazan je sumarni pregled vrednosti ovog pokazatelja za različite slučajeve razvoja modela.

Tabela 27. Osrednjene vrednosti srednje kvadratne greške predviđanja modela za različite slučajeve razvoja modela

Neuronska mreža	Osrednjena srednja kvadratna greška predviđanja modela [mm]
Mreža sa 8 skrivenih neurona, obučavana na osnovu rezultata fizičkog eksperimenta, na izlazu mreže eksplicitna visina mikroprofila h_{EF}	2.35
Mreža sa 6 skrivenih neurona, obučavana na osnovu rezultata fizičkog eksperimenta, na izlazu mreže empirijski korektivni faktor λ_{NET}	2.68
Mreža sa 20 skrivenih neurona, obučavana na osnovu rezultata virtuelnog eksperimenta, na izlazu mreže eksplicitna visina mikroprofila h_{EF}	2.05
Mreža sa 12 skrivenih neurona, obučavana na osnovu rezultata virtuelnog eksperimenta, na izlazu mreže empirijski korektivni faktor λ_{NET}	1.81
Mreža sa 12 skrivenih neurona, obučavana za konstantnu geometriju prepreke, na izlazu mreže eksplicitna visina mikroprofila h_{EF}	0.59
Mreža sa 12 skrivenih neurona, obučavana za konstantnu geometriju prepreke, na izlazu mreže empirijski korektivni faktor λ_{NET}	0.61

Da bi se na osnovu vrednosti pokazatelja odstupanja modela od referentnih eksperimentalno utvrđenih vrednosti mogao doneti zaključak o performansama modela u smislu tačnosti predviđanja, potrebno je dobijena odstupanja po veličini uporediti sa uobičajenim vrednostima visine efektivnog mikroprofila podloge. Dijapazon posmatranih pomeranja relevantnih za praksu, odnosno red veličine maksimalnih amplituda, uglavnom je blizak zoni intervala $\sim 50 \div 100$ mm (tačke 7.6.3 i 7.7.6). Poredeći vrednosti odstupanja iz tabele 27 sa ovim veličinama, dolazi se do zaključka da odstupanja modela po redu veličine iznose orijentaciono ispod (5÷10)%. U zoni manjih amplituda (početni deo krive kvazistatičke envelope) procentualna odstupanja doduše mogu biti veća ali su ove amplitude u manjoj meri merodavne za frekventni sastav pobude. Sa druge strane, kvalitativna analiza toka krivih kvazistatičke envelope dobijene neuronskim mrežama pokazuje da su odstupanja pretežno ravnomerno raspoređena duž krive, dok su u nekim slučajevima veća odstupanja upravo na završnim delovima.

Osrednjena odstupanja modela takođe je potrebno uporediti sa pokazateljima rasipanja mernih rezultata odnosno sa procenom standardne devijacije rezultata eksperimentalnih merenja (tabela 14, tačka 7.6.4) Pri tome se postavlja pitanje da li je dopušteno direktno upoređivanje izračunatih vrednosti srednje kvadratne greške modela sa pokazateljima rasipanja pri merenju. Naime, vrednosti navedene u tabeli 14 su u odnosu na vrednosti iz tabele 27 računane na drugi način, iako prema istom obrascu (relacija 47, tačka 7.6.4). U tabeli 14 su prikazane vrednosti devijacije ključnih geometrijskih parametara kvazistatičke envelope, dok se vrednosti srednje kvadratne greške modela odnose na odstupanja između

modelirane i izmerene vrednosti visine efektivnog mikroprofila u 20 tačaka. Kako je, međutim, i u jednom i u drugom slučaju reč o pokazateljima geometrijskog mesta pojedinih tačaka kvazistatičke envelope, može se zaključiti da je svrsishodno direktno međusobno upoređivanje veličina dobijenih rezultata.

U tabeli 28 ukratko su rezimirani ključni rezultati procene standardne devijacije mernih rezultata iz tabele 14.

Tabela 28. Vrednosti procenjene standardne devijacije eksperimentalno izmerenih vrednosti geometrijskih parametara kvazistatičke envelope

Parametar	Rang vrednosti st. devijacije [mm]	Prosečna vrednost st. dev. [mm]	
L_S – uzdužno rastojanje tačke diskontinuiteta od mesta početka odziva pneumatika	$\sim 4 \div 56$	~ 12	
H_S – visina tačke diskontinuiteta	$\sim 1 \div 3$	~ 2	
H_{SR} – visina kvazistatičke envelope u središnjoj tački	$\sim 0 \div 7.5$	~ 3	

Izvor podataka: tabela 14, tačka 7.6.4
Definicija i detaljnije objašnjenje geometrijskih parametara: slika 10, tačka 3.4.3

Upoređujući odstupanja modela (tabela 27) sa rasipanjem rezultata merenja (tabela 28), uočava se da su odstupanja modela po redu veličine pretežno primetno manja do približno jednaka rasipanjima mernih rezultata.

Pored tačnosti, drugi bitan pokazatelj performansi modela je brzina njegovog izvršavanja na računaru. U ovom delu rada, zbog nedostatka objektivnih kriterijuma i pokazatelja za ocenu brzine, moguće je samo izneti subjektivan utisak da je brzina izvršavanja zadovoljavajuća. Poredeći brzinu izvršavanja empirijskog modela sa brzinom izvršavanja fizički zasnovanog međuradijalnog modela (tačka 7.7), uočava se da postoji značajna i primetna razlika u korist ovog prvog. Konačan zaključak o brzini izvršavanja modela svrsishodno je doneti tek nakon integracije empirijskog modela kvazistatičke envelope u kompletan model pneumatika, odnosno njegovim povezivanjem sa modelom elastične strukture pneumatika.

Različiti slučajevi za koje je u prethodnom delu rada izvršeno formiranje empirijskog modela kvazistatičke envelope kretanja traktorskog pneumatika na bazi veštačke neuronske mreže sumirani su u levoj koloni tabele 27. Slučajevi se među sobom razlikuju prema vrsti podatka na izlazu modela (h_{EF} ili λ_{NET}), poreklu empirijskih podataka (fizički eksperiment ili simulacija sa modelom pneumatika sa radijalnim oprugama) i promenljivosti geometrijskih parametara poprečnog preseka prepreke (promenljiva ili stalna geometrija). Obuka sa različitim konfiguracijama neuronskih mreža je pokazala da povećanje odnosno smanjenje broja skrivenih neurona nema uvek jednoznačan uticaj na performanse modela. U nekim slučajevima je sa povećanjem broja skrivenih neurona dolazilo do stagnacije pa i narušavanja performansi modela, da bi se sa daljim povećavanjem performanse ponovo poboljšale. Takođe, proces validacije modela je

pokazao da poređenje grešaka kontrolnih setova podataka ne može da se tretira kao jednoznačni kriterijum za konačan izbor optimalne konfiguracije neuronske mreže već samo kao jedna od smernica za dalje sprovođenje sveukupnog postupka validacije. Ovaj postupak mora biti zasnovan na sveobuhvatnom poređenju performansi različitih konfiguracija modela. U nekim slučajevima, naime, proces validacije je pokazao da su najbolje performanse modela postignute kod konfiguracija koje se nisu odlikovale najmanjom vrednošću greške kontrolnog seta podataka pri obuci. Pri validaciji modela setovi podataka su bili deljeni u tri grupe:

1. Podaci koji nisu korišćeni u procesu obuke
2. Podaci koji su u toku obuke korišćeni za kontrolu sposobnosti generalizacije
3. Podaci korišćeni za obuku

Pri tome su za donošenje konačnih zaključaka o performansama modela bili merodavni podaci iz prve dve od navedenih grupa.

U slučaju korišćenja fizičkog eksperimenta dobijeni su pretežno zadovoljavajući rezultati odnosno stepen slaganja predviđanja modela sa rezultatima merenja je znatan. Za model kod kog se kao izlazna veličina koristi h_{EF} , međutim, u nekim slučajevima se javljalo uočljivo odstupanje visine efektivnog mikroprofila pri nultoj vrednosti normiranog položaja točka odnosno u momentu uspostavljanja inicijalnog kontakta između točka i prepreke. Ovo je ocenjeno kao neprihvatljivo jer se usled tog odstupanja elastičnoj strukturi u početnom trenutku saopštava efektivna pobuda u formi intenzivnog udarnog dejstva, što nije u skladu sa filtrirajućim svojstvima stvarnog pneumatika. Ovaj problem je prevaziđen upotrebom modela kod koga kao izlazna veličina figuriše empirijski korektivni faktor λ_{NET} . U ovom drugom slučaju, međutim, postignute su nešto slabije performanse modela, odnosno kod pojedinih setova podataka za validaciju nešto su izraženija odstupanja između predviđanja modela i rezultata merenja. Ova odstupanja, sa druge strane, osim što nisu izraženog intenziteta, javljaju se pretežno u završnom delu hoda točka¹⁶ tako da u kvalitativnom smislu manje doprinose narušavanju performansi modela u odnosu na odstupanja pri inicijalnom kontaktu kakva se javljaju u slučaju kada se na izlazu modela javlja h_{EF} .

Kada su za obuku neuronskih mreža korišćeni rezultati virtuelnog eksperimenta, postignute su vidno lošije performanse modela u odnosu na prethodni slučaj. U prethodnom slučaju, naime, korišćene su po tri diskretne vrednosti za radni režim pneumatika (iskazan kroz kontaktnu dužinu l_{KONT}), dužine prepreke L_P i visine prepreke H_P . S obzirom na nemogućnost realizacije nekih od kombinacija eksperimentalnih parametara, na raspolaganju je bio ukupno 21 set eksperimentalnih podataka za uspostavljanje empirijskog modela i sprovođenje validacije. Ovaj set je još dopunjen rezultatima numeričke simulacije kotrljanja krutog točka ($l_{KONT}=0$) preko korišćenih prepreka, što je dodalo još jednu diskretnu vrednost parametra radnog režima a ukupan broj setova empirijskih podataka povećalo na 28. Ovo se pokazalo kao dovoljno da model postigne sposobnost generalizacije za ove, relativno malobrojne, diskretne nivoe parametara. U slučaju korišćenja virtuelnog eksperimenta za prikupljanje empirijskih podataka formirano je 100 setova podataka od kojih je 67 korišćeno za obuku, 18 za kontrolu generalizacije pri obuci i 15 za završno testiranje performansi modela. Nivoi

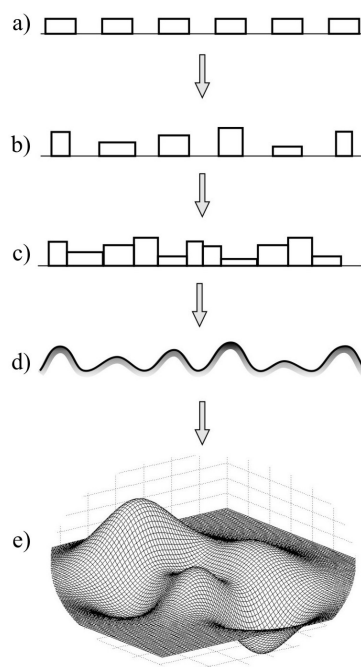
¹⁶ Hod se, zbog simetrije kvazistatičke envelope, posmatra od uspostavljanja kontakta točka i prepreke do trenutka kada se položaji vertikalnih osa simetrije točka i prepreke izjednače.

parametara (parametar radnog režima – u ovom slučaju vertikalna reakcija podloge G_T , kao i dimenzije prepreke L_P i H_P) birani su kao slučajni brojevi sa uniformnom raspodelom iz kontinualnih intervala ograničenih minimalnim i maksimalnim vrednostima. Stoga je nivo varijacija vrednosti ovih parametara mnogo intenzivniji nego u prethodnom slučaju. Pogoršanje performansi modela stoga u ovom slučaju verovatno predstavlja posledicu neadekvatnog izbora podataka za obuku odnosno nedovoljne količine setova empirijskih podataka. Prema takvoj pretpostavci, proširenje seta empirijskih podataka i njihovo korišćenje u obuci moglo bi dovesti do uspostavljanja modela sa zadovoljavajućim performansama. Ovoj pretpostavci u prilog ide i činjenica da su kod nekih setova podataka pri validaciji postignuti sasvim zadovoljavajući rezultati. Ovo ukazuje na to da model ima kapacitet da odgovori na postavljene zahteve pod pretpostavkom da se pri procesu obuke raspolaže potpunim skupom setova empirijskih podataka koji na reprezentativan način odlikavaju ponašanje posmatranog sistema. Alternativno rešenje, umesto povećanja broja setova podataka za obuku, bilo bi da se i u ovom slučaju parametri simulacije izaberu između ograničenog broja raspoloživih diskretnih vrednosti, a ne na slučajan način iz šireg intervala kontinualnog karaktera.

U završnom delu razvoja modela sprovedena je obuka za slučaj konstantne geometrije prepreke. Konstatovano je da ovo može biti slučaj od interesa sa aspekta praktične primene modela. Kod modela je zadržana sposobnost varijacije parametra radnog režima kako bi se pri sprezanju sa modelom elastične strukture filtrirajuća svojstva modela uskladila sa dinamičkim fluktuacijama vertikalnog opterećenja. U ovom slučaju postignuti su zadovoljavajuće performanse modela za obe varijante izlazne veličine, h_{EF} odn. λ_{NET} . U ovom prvom slučaju rezultati su i nešto bolji nego u drugom. Od interesa je uočiti da je pri ovom pristupu u znatno manjoj meri izražen zahtev za sposobnošću generalizacije. Ovo bi moglo da omogući da se, prema potrebi, stepen tačnosti predviđanja modela eventualno poboljša značajnijim povećanjem broja skrivenih neurona. S obzirom na postignute performanse modela, međutim, za ovakvim postupkom nije bilo potrebe.

8.5.7 UTVRĐIVANJE PRAVACA DALJIH ISTRAŽIVANJA

Istraživanja sprovedena u ovom radu bavila su se kotrljanjem pneumatika preko singularne prepreke pravougaonog poprečnog preseka. Istraživanjima su obuhvaćeni slučajevi prepreke sa nepromenljivom geometrijom, prepreke čiji parametri predstavljaju članove skupa manjeg broja diskretnih vrednosti, kao i prepreke sa pravougaonim poprečnim presekom proizvoljnih dimenzija (iz kontinualnog skupa vrednosti, sa ograničenom minimalnom i maksimalnom vrednošću). U prva dva slučaja postignuti su zadovoljavajući rezultati, dok je za nastavak istraživanja predviđena provera mogućnosti da se i u trećem slučaju (proizvoljna geometrija) postigne zadovoljavajuća tačnost modela. Pomenuti slučajevi šematski su prikazani na slici 100, pozicije a) i b).



*Slika 100. Predviđene etape razvoja modela sa aspekta opštosti geometrije podloge:
 a) singularna prepreka konstantne geometrije; b) prepreke pravougaonog poprečnog preseka promenljivih dimenzija; c) promenljiva geometrija profila podloge formirana od niza singularnih prepreka; d) proizvoljhna geometrija podloge za ravanski model envelope kretanja; e) proizvoljna prostorna geometrija profila podloge*

Sledeću etapu bi predstavljalo osposobljavanje modela za odziv na podlozi čija je geometrija sačinjena od proizvoljno raspoređenih singularnih prepreka različitih dimenzija, slika 100 c). Ova varijanta predstavlja prelazni slučaj nakon kog bi sledilo formiranje modela za proizvoljnu geometriju podloge, za slučaj uzdužnog modela, slika 100 d). Kao poslednja etapa razvoja modela može se smatrati usvajanje proizvoljne prostorne strukture podloge, slika 100 e). U ovom slučaju bi od interesa bilo i proširenje funkcionalnosti modela uključenjem mogućnosti predviđanja bočne sile na točku. Za ovo je, doduše,

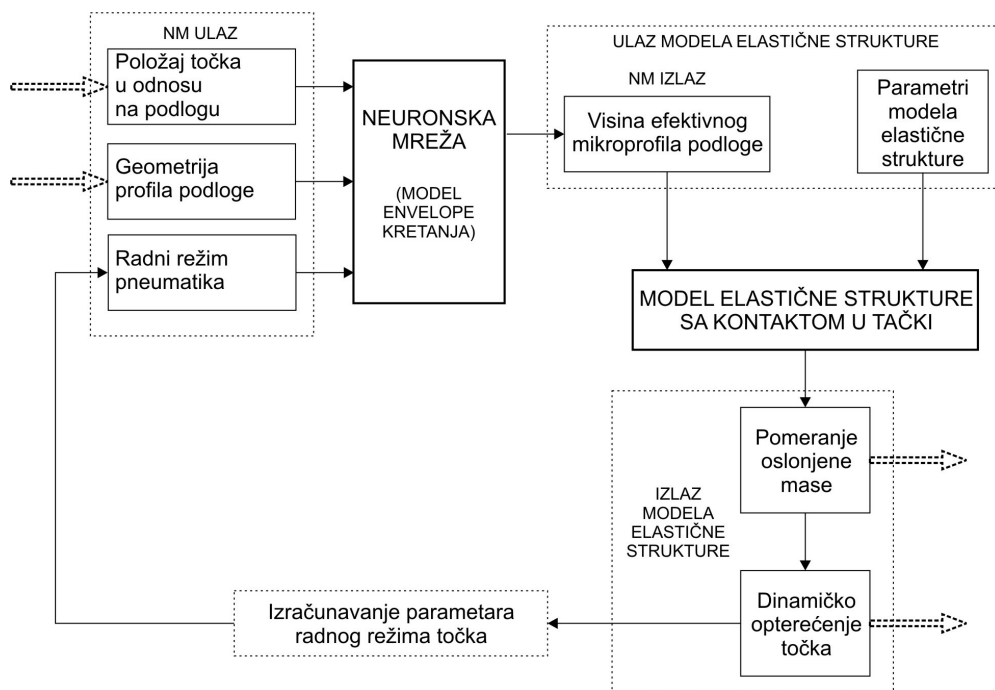
neophodna i odgovarajuća rekonstrukcija mernog postrojenja tako da se omogućii eksperimentalno merenje ovog parametra kako bi isti mogao da bude uključen u empirijski model.

8.6 Aplikacija modela – integracija sa modelom elastične strukture

U uvodnom delu je objašnjeno da je svrha modela envelope kretanja ta da saopšti efektivnu oscilatornu pobudu modelu elastične strukture pneumatika sa kontaktom u tački. Sa druge strane, model kvazistatičke envelope putem povratne sprege dobija od modela elastične strukture informaciju o tekućoj vrednosti parametara koji definišu radni režim pneumatika u smislu filtrirajućih karakteristika tj. forme efektivnog mikroprofila za datu geometriju podloge. Prema tome, generalni oscilatorni model pneumatika se kod ovakvog pristupa sastoji od dve komponente koje međusobno razmenjuju informacije (slika 1):

- model kvazistatičke envelope, i
- model elastične strukture pneumatika.

Opšta forma strukture generalnog modela pneumatika formiranog integracijom modela kvazistatičke envelope i modela elastične strukture sa kontaktom u tački prikazana je na slici 101.



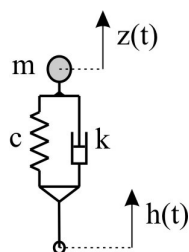
Slika 101. Uprošćena struktura generalnog oscilatornog modela pneumatika

Ovaj koncept je univerzalan. Model elastične strukture može biti proizvoljnog stepena složenosti, počevši od baznog modela koji se sastoji od paralelne veze linearnog elastičnog i prigušnog elementa, pa sve do sofisticiranijih modela koji obuhvataju više aspekata

dinamike točka uključujući modeliranje sopstvenih formi glavnih oscilacija. U okviru ove tačke predmet rada je razvoj generalnog oscilatornog modela, odnosno uspostavljanje veze između modela kvazistatičke envelope zasnovanog na veštačkoj neuronskoj mreži i modela elastične strukture sa kontaktom u tački.

U predmetnom radu za model elastične strukture sa kontaktom u tački usvojen je najjednostavniji koncept, tj. paralelna veza linearne opruge i amortizera (slika 102). Ovakav izbor je načinjen na osnovu sledećih faktora:

1. u fokusu istraživanja u ovom radu je sam razvoj modela kvazistatičke envelope, zbog čega korišćenje kompleksnih modela elastične strukture nije smatrano celishodnim;
2. odgovarajuće ispitno postrojenje za detaljnije ispitivanje ponašanja pneumatika u dinamičkim uslovima, neophodno za prikupljanje empirijskih podataka potrebnih za parametrizaciju kompleksnijih modela elastične strukture pneumatika, nije bilo na raspolaganju u predmetnom istraživanju.



Slika 102. Uprošćeni model elastične strukture pneumatika sa kontaktom u tački, zasnovan na rednoj vezi linearnog elastičnog i prigušnog elementa: m – oscilatorna masa, c – koeficijent krutosti, k – koeficijent prigušenja, $h(t)$ – oscilatorna pobuda u vertikalnom pravcu, $z(t)$ – odziv: vertikalno pomeranje centra točka

Parametri ovako odabranog modela elastične strukture – koeficijenti krutosti i prigušenja, kao i geometrijske međuzavisnosti pri statičkim deformacijama – određeni su u okviru dela istraživanja opisanog u poglavlju 6:

- vrednosti koeficijenta krutosti c [N/m]: tabela 3, tačka 6.6.3
- vrednosti koeficijenta prigušenja k [Ns/m]: tabela 4, tačka 6.6.4
- relacija između kontaktne dužine i defleksije: izraz (17), tačka 6.6.2
- zavisnost kontaktne dužine od vertikalnog opterećenja sa pritiskom kao parametrom: izraz (19), tačka 6.6.2

Implementacija modela zasnovanog na veštačkoj neuronskoj mreži izvršena je saglasno sa razmatranjima navedenim u tačkama 4.2.1, 4.3 i 8.5.2.

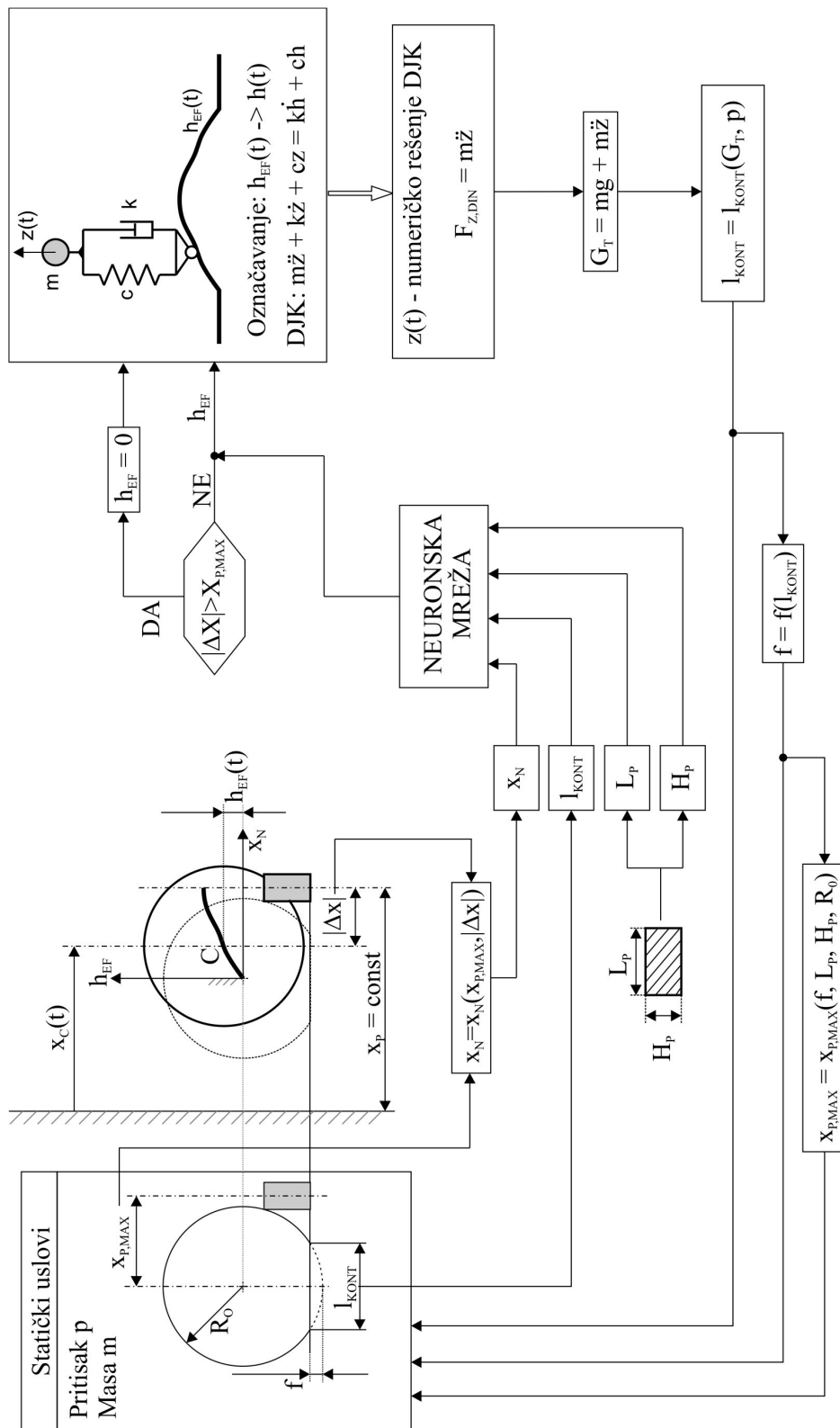
Diferencijalna jednačina kretanja modela prikazanog na slici 102 data je izrazom (20), tačka 7.5:

$$m\ddot{z} + k\dot{z} + cz = kh + ch \dots\dots\dots(20.)$$

Značenje oznaka u izrazu (20) prikazano je uz sliku 102.

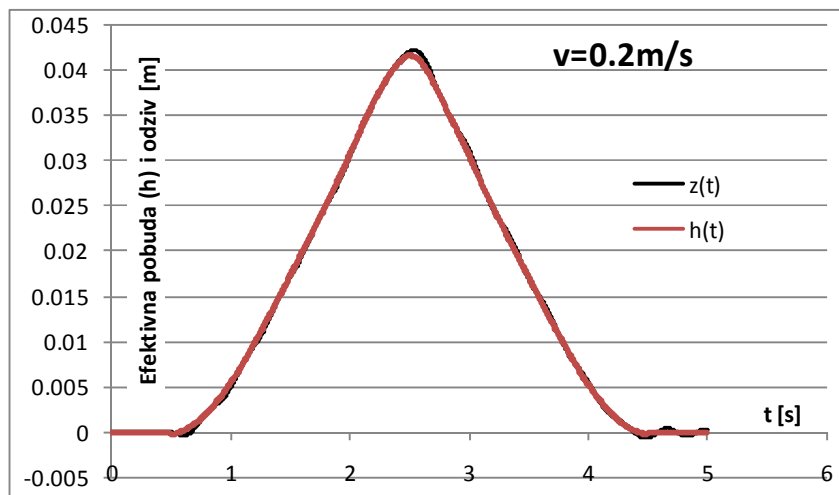
Detaljnija šema generalnog oscilatornog modela pneumatika sa tokom signala prikazana je na slici 103. Na prikazanoj šemi usvojeno je da se kao parametar radnog režima pneumatika sa aspekta karakteristika kvazistatičke envelope koristi kontaktne dužina, l_{KONT} . Alternativno, kako je objašnjeno u ranijem izlaganju, umesto kontaktne dužine u istu svrhu može se koristiti i vertikalno opterećenje točka odnosno udeo vertikalne reakcije prouzrokovan dejstvom elastične deformacije strukture pneumatika. Prvobitno pomenuti pristup (sa l_{KONT}) je univerzalniji s obzirom na to da važi za bilo koji pritisak u pneumatiku. Teorijski, kao pokazatelj radnog režima mogao bi se koristiti i ugib pneumatika (radijalna defleksija), ali je ovo rešenje odbačeno iz praktičnih razloga što je obrazloženo u okviru tačke 8.1.1.

Jednačina (20), kojom se opisuje kretanje sistema prikazanog na slici 102, predstavlja nehomogenu linearnu diferencijalnu jednačinu drugog reda, za koju je moguće pronaći rešenje u analitičkom obliku za širok spektar oblika pobudne funkcije $h(t)$. U predmetnom slučaju, međutim, funkcija $h(t)$ nije unapred poznata. Naime, visina efektivnog mikroprofila $h(t)$, sa jedne strane, određuje odziv $z(t)$. Sa druge strane, postoji povratna sprega s obzirom na to da odziv elastične strukture određuje radni režim pneumatika, koji, opet, definiše karakteristike kvazistatičke envelope na osnovu kojih se formira efektivna pobuda $h(t)$. Zbog toga je jednačinu kretanja neophodno rešavati numeričkim putem, tako da se u trenutku $t=t_{k+1}$ za izračunavanje efektivne pobude $h(t_{k+1})$ koristi vrednost odziva u prethodnom trenutku, $z(t_k)$. Pri tome "k" označava redni broj koraka numeričkog procesa. Program za numeričku simulaciju vertikalne dinamike traktorskog pneumatika prema šematskom prikazu sa slike 103 dat je na priloženom CD-ROM-u.

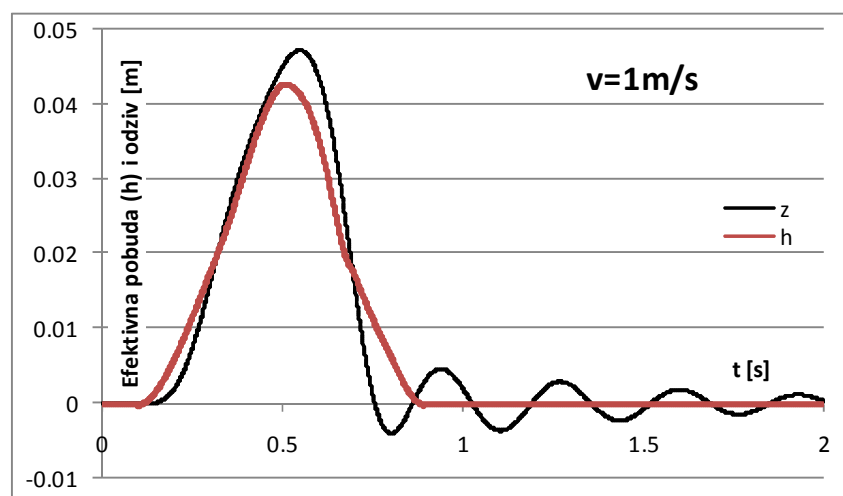


Slika 103. Tok informacija generalnog oscilatornog modela pneumatika sastavljenog iz modela kvazistatičke envelope i modela elastične strukture

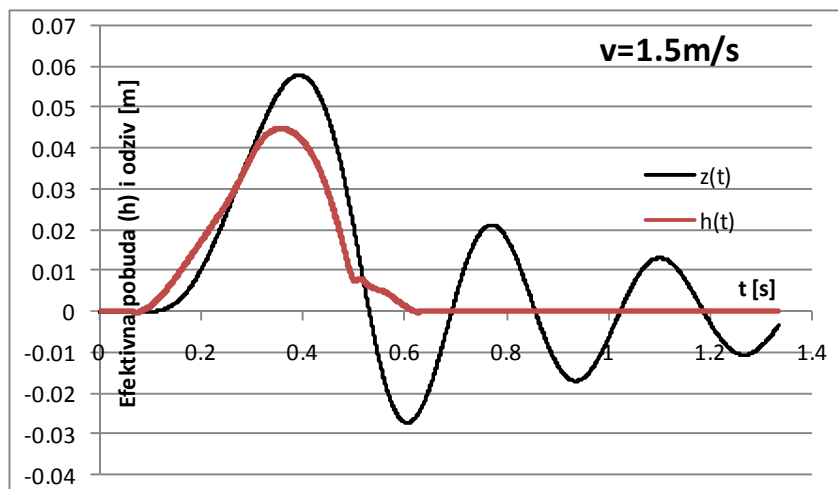
Rezultati simulacije kotrljanja traktorskog pneumatika preko prepreke dimenzija 200×50 mm za nekoliko vrednosti brzine kretanja prikazani su na slikama 104 - 107. U simulacijama je korišćena neuronska mreža sa 8 skrivenih neurona prema tački 8.5.5. S obzirom na to da pri istraživanju nije bilo na raspolaganju merno postrojenje za merenje odziva pneumatika u dinamičkim uslovima, nije bilo moguće izvršiti validaciju generalnog oscilatornog modela pneumatika formiranog prema šemi na slici 103. Stoga rezultati prikazani na ovom mestu imaju informativni karakter. Takođe, dobijeni rezultati su u funkciji preliminarnog istraživanja načina sprežanja modela kvazistatičke envelope zasnovanog na veštačkoj neuronskoj mreži i elastične strukture.



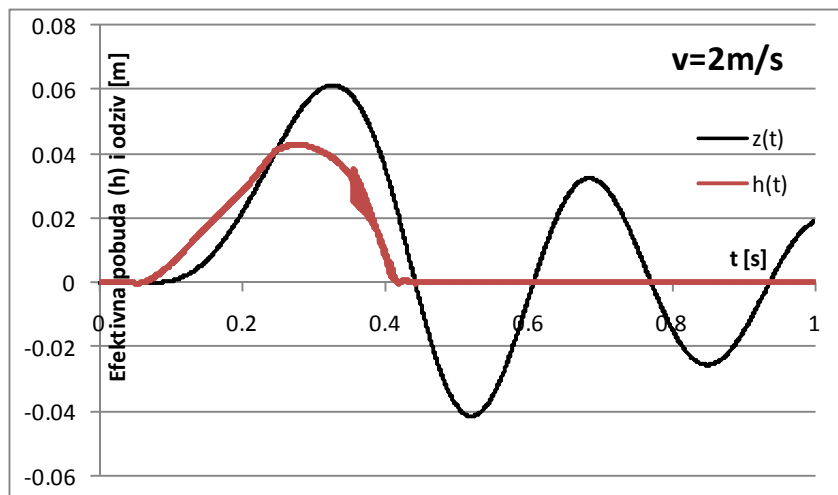
Slika 104. Rezultati simulacije kotrljanja traktorskog pneumatika preko prepreka dimenzija 200×50 mm pri brzini $v=0.2$ m/s (kvazistatički uslovi): h – visina efektivnog mikroprofila, z – vertikalno pomeranje centra naplatka u odnosu na početni položaj



Slika 105. Rezultati simulacije kotrljanja traktorskog pneumatika preko prepreka dimenzija 200×50 mm pri brzini $v=1$ m/s



Slika 106. Rezultati simulacije kotrljanja traktorskog pneumatika preko prepreka dimenzija 200×50 mm pri brzini $v=1.5\text{m/s}$



Slika 107. Rezultati simulacije kotrljanja traktorskog pneumatika preko prepreka dimenzija 200×50 mm pri brzini $v=2\text{m/s}$

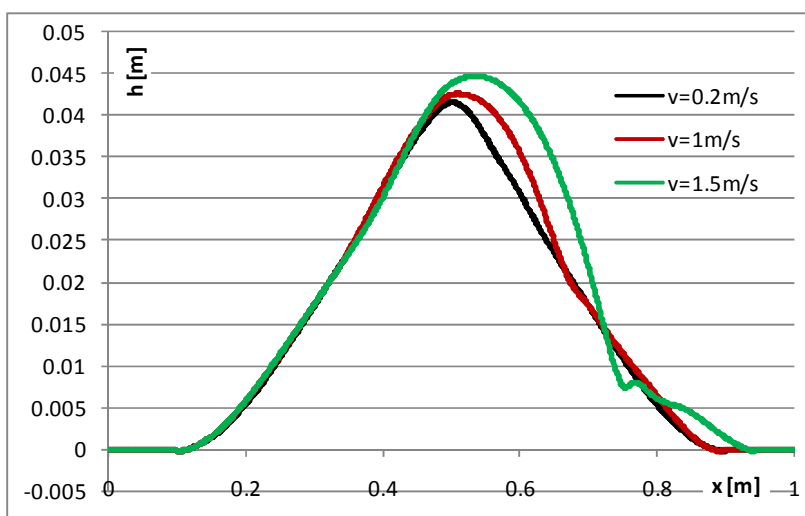
Rezultati simulacije prikazani na slici 104 dobijeni su za brzinu kretanja $v = 0.2 \text{ m/s}$, što se može smatrati kvazistatičkim uslovima. Dobijeni rezultati su u skladu sa ovom okolnošću, što se iskazuje kroz sledeće karakteristike:

- pobuđivanje elastične strukture na oscilovanje je zanemarljivo, odakle sledi da je njena statička defleksija približno konstantna odnosno trajektorija centra pneumatikase gotovo u potpunosti podudara sa odgovarajućom kvazistatičkom envelopom;
- oblik kvazistatičke envelope odgovara nepromenljivom vertikalnom opterećenju tj. njegovoj statičkoj vrednosti.

Na slikama 105, 106 i 107 prikazani su rezultati simulacija pri povećavanju brzine kretanja na 1, 1.5 i 2 m/s respektivno. Na ovim slikama se može uočiti oscilatorni karakter kretanja

centra točka u vertikalnom pravcu, što je posledica pobuđivanja elastične strukture pri konačnoj (za razliku od kvazistatičkih uslova) vrednosti brzine kretanja pri kojoj točak nailazi na prepreku. Oscilacije elastične strukture odnosno posledične fluktuacije vertikalne reakcije i defleksije pneumatika uslovljavaju kontinualnu promenu karaktera kvazistatičke envelope. Time nastaje povratna sprega između odziva i pobude. Na slici 107 se na silaznom delu efektivnog mikroprofila može uočiti pojava numeričke nestabilnosti rešenja u vremenskom domenu. Ova nestabilnost se ogleda u fluktuacijama visine ordinate efektivnog mikroprofila, relativno ograničene po amplitudi ali izrazito visoke frekvencije, koja odgovara vrednosti vremenskog koraka pri numeričkom rešavanju jednačine kretanja. Kako funkcija dinamičkog uvećanja sistema sa slike 102 teži nuli kada frekvencija pobude teži beskonačnosti, uočena pojava nije uticala na vrednosti rezultata pomeranja oslonjene mase. Pojava, je, međutim, sa stanovišta kvaliteta i validnosti modela, izrazito nepovoljna. Za utvrđivanje tačnog uzroka njenog nastanka i pronalaženje načina za njeno otklanjanje potrebno je sprovesti dalja istraživanja.

Poređenjem rezultata prikazanih na slikama 104 - 107 može se uočiti uticaj fluktuacija pokazatelja radnog režima na formiranje efektivnog mikroprofila. Ova pojava dodatno je ilustrovana slikom 108, na kojoj je oblik efektivne pobude za tri slučaja prikazan u prostornom domenu.



Slika 108. Poređenje oblika efektivne pobude u prostornom domenu za tri različite vrednosti uzdužne brzine kretanja točka preko neravnine podloge

Na slici 108 prikazani su oblici efektivnog mikroprofila za kvazistatičke uslove ($v = 0.2 \text{ m/s}$) kao i za dve konačne vrednosti brzine kretanja, 1 i 1.5 m/s. Na ovoj slici se može uočiti da izraženije fluktuacije dinamičkih opterećenja karakteristične za veće brzine kretanja dovode i do izrazitijih promena u obliku efektivne pobude. Uočava se da na nailaznim delovima krivih ne postoje značajne razlike, dok se počevši od dostizanja maksimuma pa nadalje ovo stanje menja. Nakon početnog saopštavanja pobude, sistemu je potrebno određeno vreme da započne sa oscilatornim kretanjem. Kako je sa povećanjem brzine pobuda intenzivnija, to će i dinamičke fluktuacije vertikalne reakcije biti izraženije, a time i promene u geometriji efektivnog mikroprofila.

9. ZAKLJUČAK

U radu je razvijen originalni empirijski model kvazistatičke envelope kretanja traktorskog pneumatika na bazi veštačke neuronske mreže. Rezultat rada predstavlja nov koncept empirijskog modeliranja svojstava pneumatika kao geometrijskog niskopojasnog filtera, kakav nije bio obuhvaćen dosadašnjim istraživanjima i publikacijama iz ove oblasti, što je utvrđeno pregledom literature. Utvrđen je način prikupljanja i obrade empirijskih podataka u funkciji optimalnog razvoja modela. U radu je, dalje, utvrđen praktično primenljiv metod primene modela za simulacije oscilatornog ponašanja pneumatika integracijom modela kvazistatičke envelope u sveobuhvatni oscilatorni model pneumatika koji, pored modela envelope, čini još i model elastične strukture. Time je dobijen model pneumatika koji može da opiše osnovne aspekte dinamičkog ponašanja pneumatika pri vertikalnoj oscilatornoj pobudi usled kratkotalasnih neravnina podloge. Način integracije komponenata (neuronska mreža i model elastične strukture) u globalni model pneumatika takođe predstavlja originalno rešenje razvijeno u ovom radu. U radu su korišćeni rezultati sopstvenih eksperimentalnih istraživanja i razvijene teorijske osnove za rešavanje problema.

Najvažnije karakteristike modela, njegove prednosti i nedostaci, mogu se razdvojiti na grupu karakteristika vezanih za upotrebu, i onih vezanih za razvoj modela. Sa stanovišta korišćenja modela kao najvažnije može se istaći sledeće:

- Model sadrži mali broj parametara, jednostavan je i odlikuje se znatno većom brzinom izvršavanja u odnosu na fizički zasnovane modele. U slučaju adekvatno sprovedenog razvoja, model se odlikuje visokom tačnošću predviđanja. Ove glavne karakteristike modela ujedno predstavljaju i njegove osnovne prednosti.
- Aplikacija modela moguća je primenom univerzalnih i dostupnih računarskih programa, što se može smatrati prednošću modela.
- Osnovno ograničenje modela, ugrađeno u njegove performanse samim izborom pristupa pri njegovom formiranju, predstavlja nemogućnost upotrebe za raznovrsnije i opštije forme geometrije neravnina stvarnog profila podloge.
- S obzirom na to da model pripada grupi empirijskih modela, karakteriše ga odsustvo eksplicitne veze između internih parametara modela i fizičkih karakteristika modeliranog sistema. Ovo dovodi do odsustva fleksibilnosti modela pri izmeni nekog od fizičkih parametara sistema. U takvom slučaju potrebno je nanovo sprovesti proces razvoja modela odnosno obuke neuronske mreže, što se može smatrati nedostatkom.

U pogledu karakteristika modela vezanih za njegov razvoj, najvažnija svojstva su:

- Eksperimentalna merenja potrebna za prikupljanje empirijskih podataka u funkciji razvoja modela mogu se sprovesti korišćenjem univerzalnih i relativno dostupnih mernih uređaja, što se može ubrojati u prednosti modela.
- Parametri modela (sinaptički koeficijenti neuronske mreže) su internog karaktera i određuju se automatski tokom obuke neuronske mreže, odnosno nije potreban zaseban postupak parametrizacije modela, što takođe predstavlja prednost.

- Jedan od glavnih nedostataka modela je nepostojanje jednoznačnih kriterijuma za izbor strukture neuronske mreže, načina zadavanja ulaznih podataka i optimalnog izbora seta empirijskih podataka. Posledica toga je potreba za intenzivnim radom na razvoju modela u velikoj meri zasnovanom na iskustvu i postupku probe i greške.
- Kao nedostatak može se takođe navesti potreba za intenzivnim radom na sprovođenju eksperimentalnih merenja kao i na obradi prikupljenih podataka.

Osnovni zadatak i ključni aspekt rada predstavljali su razvoj modela kvazistatičke envelope kretanja i njegova integracija u dinamički model pneumatika. S obzirom na originalnost u pristupu i rešenju problema, realizacija ovog cilja se može smatrati doprinosom nauci. Pored toga, sprovedena su opštija eksperimentalna istraživanja ponašanja traktorskog pneumatika pri kotrljanju preko kratkotalasnih neravnina. Ova istraživanja odnosno njihovi rezultati takođe predstavljaju doprinos naučnom izučavanju posmatranog fenomena, s obzirom na to da su dosadašnji publikovani radovi iz ove oblasti malobrojni. Uvođenje geometrijskih parametara kvazistatičke envelope na način utvrđen u radu predstavlja sopstveni doprinos unapređenju metoda za analizu rezultata eksperimentalnih merenja i računarskih simulacija.

Primena neuronske mreže za empirijsko modeliranje envelope kretanja u ovom radu motivisana je izraženim nelinearnostima i kompleksnim formama ponašanja strukture pneumatika koje uslovljavaju njegov odziv u posmatranim uslovima. Pored ovoga, u pripremljenoj fazi istraživanja, bilo je predviđeno da se modelom zasnovanim na neuronskoj mreži obuhvati širi spektar dinamičkog ponašanja, uključujući i frekventnu zavisnost odziva koja može doći do izražaja u dinamičkim uslovima a predstavlja posledicu viskoelastičnog ponašanja elastomera prisutnog u fizičkoj strukturi pneumatika. Kako, međutim, pomoću raspoložive eksperimentalne infrastrukture nije bilo moguće pneumatiku saopštiti odgovarajuću pobudu odnosno prikupiti odgovarajuće empirijske podatke za ovu vrstu istraživanja, to ni realizacija ovog dela plana nije bila moguća.

Na osnovu toka istraživanja i krajnjih rezultata rada izvedeni su zaključci o mogućim budućim pravcima istraživanja. Treba napomenuti da je realizacija navedenih mogućnosti u velikoj meri vezana za raspoloživost eksperimentalnog postrojenja odgovarajućih kapaciteta. Kao mogući pravci daljih istraživanja mogu se navesti:

1. puna validacija integrisanog dinamičkog modela na osnovu rezultata merenja parametara ponašanja traktorskog pneumatika u dinamičkim uslovima;
2. utvrđivanje i otklanjanje uzroka numeričke nestabilnosti integrisanog dinamičkog modela pneumatika ispoljene u nekim slučajevima simulacije;
3. proširenje oblasti primene modela envelope kretanja omogućavanjem saopštavanja proizvoljne forme stvarnog profila podloge u ravni ili u prostoru;
4. proširenje funkcionalnosti modela uključenjem mogućnosti predviđanja uzdužne i bočne sile na točku
5. korišćenje veštačkih neuronskih mreža za unapređenje samog modela elastične strukture, proširenjem spektra dinamičkih performansi koje se mogu modelirati, realnijim uzimanjem u obzir uticaja pritiska i brzine na elastična i prigušna svojstva u širem dijapazonu amplituda i frekvencija pobude, itd.
6. kao alternativa koncepciji integracije modela kvazistatičke envelope i elastične strukture, svrsishodno je ispitati mogućnost globalnog empirijskog dinamičkog

modela pneumatika, sposobnog za reprezentaciju određenog spektra dinamičkih fenomena koje ispoljava traktorski točak u kotrljanju, u potpunosti zasnovanog na neuronskoj mreži. U ovom slučaju pristup formiranju modela u smislu osnovne strukture, ulaznih i izlaznih parametara, bio bi različit u odnosu na koncept korišćen u ovom radu.

10. LITERATURA

- [1] Ahmed O. B., Goupillon J. F.: Predicting the Ride Vibration of an Agricultural Tractor, *Journal of Terramechanics* 34(1997)1, 1-11
- [2] Ammon, D. u. Bormann, V.: Zur Kohärenz zwischen den Unebenheitsanregungen an linker und rechter Fahrspur. VDI-Berichte Nr. 877 (1991), Düsseldorf, VDI Verlag, 1991.
- [3] Badalamenti J. M., Doyle G. R.: Radial-Interradial Spring Tire Models, *Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 110(1988)1, 70-75
- [4] Bakker E., Nyborg L., Pacejka H. B.: Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies, SAE Paper 870421, 1987, 1-15
- [5] Bandel P., Monguzzi C.: Simulation model of the dynamic behavior of a tire running over an obstacle, *Tire Science and Technology*, 16(1988)2, 62-77
- [6] Barber A.: Accurate Models for Bushings and Dampers using the Empirical Dynamics Method, 14th European ADAMS Users' Conference, Berlin, 1999.
- [7] Barber A. J. et al: Predicting Tire Handling Performance using Neural Network Models, SAE paper 2004-01-1574
- [8] Bekker M.: *Off-Road Locomotion*, University of Michigan Press, Michigan, 1960.
- [9] Bendat J., Piersol A.: *Random data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley - Interscience, New York, 1971.
- [10] Benz R.: *Fahrzeugsimulation zur Zuverlässigkeitsabsicherung von karosseriefesten Kfz-Komponenten*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2008.
- [11] Bernd T.: *Konzeption und Simulation eines passiven Kabinenfederungssystems für Traktoren*, Dissertation, TU Carolo-Wilhelmina Braunschweig, Braunschweig, 2001.
- [12] Bertsche B.: *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [13] Boada M. J. L., Boada B. L., Garcia-Pozuelo D., Diaz V.: Neural-empirical tyre model based on recursive lazy learning under combined longitudinal and lateral slip conditions, *International Journal of Automotive Technology*, 12(2011)6, 821-829
- [14] Böhler H.: Simulation of the Dynamic Loads of a Tractor with the Help of a Multi-Body-System Program, *Proceedings of the 13th International Conference of the ISTVS/München, Germany*, 1999, 853-860.
- [15] Böhm F., Duda A.: Off-road cars and tractors with 3D tyre models for fast rolling simulation, *Vehicle System Dynamics*, 43(2005)Supplement, 493-507
- [16] Böttinger S.: *Ackerschlepper, Slajdovi sa predavanja*, www.uni-hohenheim.de/LT/Vorlesung/, pristup 10. 2. 2009.

-
- [17] Braun H.: Untersuchungen von Fahrbahnunebenheiten und Anwendungen der Ergebnisse, Dissertation, TU Carolo-Wilhelmina Braunschweig, Braunschweig, 1969.
- [18] Chae S.: Nonlinear Finite Element Modeling and Analysis of a Truck Tire, PhD thesis, Pennsylvania State University, 2006.
- [19] Coenenberg H.H.: Das äusere Schwingungsverhalten von Ackerschleppern, insbesondere ihre dynamische Achslasten, Landtechnische Forschung 12 (1962) 6, S. 157
- [20] Cutini M., Bisaglia C.: Cab damping device evaluation on tractor vibration transmission and operator comfort using a four-poster test rig, 39th International Symposium: „Actual Tasks on Agricultural Engineering“, Opatija, 2011.
- [21] Časnji F.: Ogibljeno traktorsko sedište sa inercijalnim prigušivačem oscilacija, disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, 1984.
- [22] Časnji F.: Traktori – skripta sa predavanja, FTN Novi Sad, 2006.
- [23] Časnji F., Torović T., Muzikravić V.: Energetska efikasnost traktora, Monografija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.
- [24] Demić M. Lukić J.: Teorija kretanja motornih vozila, monografija, Univerzitet u Kragujevcu – Mašinski fakultet, Kragujevac, 2011.
- [25] Detweiler Z. R.: Techniques for Using 3D Terrain Surface Measurements for Vehicular Simulations, MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [26] Deuschl M.: Gestaltung eines Prüffelds für die Fahrwerksentwicklung unter Berücksichtigung der virtuellen Produktentwicklung, Dissertation, TU München, 2006.
- [27] Ebel A.: Druckverteilung auf Kontaktflächen unter Forstreifen, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, 2006.
- [28] Einsle S.: Analyse und Modellierung des Reifenübertragungsverhaltens bei transienten und extremen Fahrmanövern, Dissertation, TU Dresden, 2010.
- [29] Eiyo F.: Effect of offroad surface roughness on tyre performance, PhD Thesis, McGill University, Quebec, 1989.
- [30] Erşahin M. A.: Finite Element Analysis of Cornering Characteristics of Rotating Tires, PhD Thesis, Middle-east Technical University, Ankara, 2003.
- [31] Ferhadbegović B: Entwicklung und Applikation eines instationären Reifenmodells zur Fahrdynamiksimulation von Ackerschleppern, Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.
- [32] Fraggstedt M.: Vibrations, damping and power dissipation in Car Tyres, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2008.
- [33] Gent, A. N., Walter, J. D. et al.: The Pneumatic Tire, US Department of Transportation - NHTSA, Washington, 2006.
- [34] Gipser, M.: Flexible Ring Tire Model - Documentation and User's Guide, http://ftire.com/download/ftire_model.pdf, pristup 8. X 2008.

-
- [35] Godbole R., Alcock R., Hettiaratchi D.: The Prediction of Tractive Performance on Soil Surfaces, *Journal of Terramechanics*, 30 (1993)6, 443-459
- [36] Gong S.: A Study of In-Plane Dynamics of Tires, Doctoral thesis, Delft University of Technology, 1993.
- [37] Hall LC.: Fundamentals of terramechanics & soil vehicle interaction. Terrain profile characteristics, *Proceedings of the wheels and tracks symposium*, Cranfield, 1998.
- [38] Heißing B., Ersoy M.: *Chassis Handbook*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [39] Herkt S.: Towards a Finite Element Tyre Model for Multibody Simulation, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2008.
- [40] Hlawitschka, E.: Zur Berechnung vertikaler dynamischer Radkräfte bei Traktoren, *Deutsche Agrartechnik* 19(1969)12, S. 562
- [41] Kageyama I., Jo H.: On Modeling of Tire Characteristics With Neural Networks, Part 1: Modeling of Side Force and Self-Aligning Torque, *Japan Society of Automotive Engineers Spring 1993 Convention*, Yokohama, 1993.
- [42] Kim H., Ro P. I.: A Tire Side Force Model By Artificial Neural Network, SAE Document Number 951051, 1995.
- [43] Kindt P.: Structure-Borne Tyre/Road Noise due to Road Surface Discontinuities, Doctoral thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2009.
- [44] Kinnebrock, W.: *Neuronale Netze – Grundlagen, Anwendungen, Beispiele*, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1992.
- [45] Kissing A., Göhlich H.: Ackerschlepper-Reifendynamik, Teil 1: Fahrbahn- und Prüfstandsergebnisse, *Grundlagen Landtechnik* 38 (1988) 3, 78-87
- [46] Koprowski-Theiß N.: Kompressible, viskoelastische Werkstoffe: Experimente, Modellierung und FE-Umsetzung, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2011.
- [47] Korunović N., Trajanović M., Stojković M., Mišić D., Milovanović J.: Finite Element Analysis of a Tire Steady Rolling on the Drum and Comparison with Experiment, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 57(2011)12, 888-897
- [48] Laib L.: Analysis of the Vibration-Excitation Effect Caused by Deformable Soil Surfaces, *Journal of Terramechanics*, 32(1995)3, 151-163
- [49] Lämmel U., Cleve J.: *Künstliche Intelligenz*, Carl Hanser Verlag München, 2012.
- [50] Langenbeck B.: Untersuchungen zum Fahrverhalten von Ackerschleppern unter besonderer Berücksichtigung der Reifeneigenschaften, *Fortschrit Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 55*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [51] Lippe W. M.: *Soft-Computing mit Neuronalen Netzen, Fuzzy-Logic und Evolutionären Algorithmen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [52] Long C., Chen H.: Comparative Study between the Magic Formula and the Neural Network Tire Model Based on Genetic Algorithm, *Third International Symposium on Intelligent Information Technology and Security Informatics*, Jian, 2010.

- [53] Mark J. E., Erman B., Eirich F. R.: Science and Technology of Rubber, Elsevier Academic Press, Burlington – San Diego – London, 2005.
- [54] Matuško J., Petrović I., Perić N.: Neural network based tire/road friction force estimation, Engineering Applications of Artificial Intelligence 21(2008)3, 442-456
- [55] Maurice J. P.: Short Wavelength and Dynamic Tyre Behaviour under Lateral and Combined Slip Conditions, Doctoral thesis, Delft University of Technology, 2000.
- [56] Mitschke M., Wallentowitz H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004.
- [57] Muzikravić V., Poznanović N., Stojić B.: Izbor pneumatika za traktore snage 30 - 60 kW, Traktori i pogonske mašine, 7(2002)4, 68-74
- [58] Muzikravić V. et al: Izbor pneumatika za traktore snage 30 - 60 kW, Studija: Unapređenje i racionalizacija korišćenja traktora - projekat finansiran od strane Ministarstva za nauku, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2003.
- [59] Muzikravić V., Časnji F., Ružić D.: Defleksija traktorskih pogonskih pneumatika, Traktori i pogonske mašine, 10(2005)4, 58-62
- [60] Nilsson C.: Waveguide Finite Elements Applied on a Car Tyre, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2004.
- [61] Oertel C., Fandre A.: Das Reifenmodellsystem RMOD-K, Ein Beitrag zum virtuellen Fahrzeug. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 103(2001)11, 1074-1079
- [62] Oueslati F.: An Analytical Investigation of Passive and Active Suspension Systems for Articulated Freight Vehicles, PhD thesis, Concordia University Montreal, Quebec, 1995.
- [63] Palkovics L., El-Gindy M.: Neural network representation of tyre characteristics: the Neuro-Tyre, Int. J. of Vehicle Design, 14(1993)5/6, 563-591
- [64] Park S., Popov A. A., Cole D. J.: Influence of soil deformation on off-road heavy vehicle suspension vibration, Journal of Terramechanics 41 (2004), 41-68
- [65] Petković Lj.: Numerička matematika sa programiranjem, Gradina, Niš, 1994.
- [66] Plessner, J.: Dynamisches Verhalten von Ackerschlepperreifen in Vertikal- und Längsrichtung auf fester Fahrbahn, Fortschritt Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 83, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [67] Pracný V.: Neural network - based shock absorber model with a thermodynamical coupling, Doctoral thesis, Helmut-Schmidt-University – University of the Federal Armed Forces Hamburg, 2008.
- [68] Rill G.: Fahrzeugdynamik, Fachhochschule Regensburg, <http://homepages.fh-regensburg.de/~rig39165/>, pristup 12.9.2007.
- [69] Ronai Đ.: Istraživanje statističkih parametara mikroprofila poljoprivrednih puteva i mogućnost njihove primene za analizu i proračun oscilacija vozila sa povećanom prohodnosti, magistarska teza, Univerzitet u Novom Sadu, 1974.
- [70] Saarilahti, M.: Soil Interaction Model, Appendix report No.6 - Modelling Wheel and Tyre, University of Helsinki, 2002.

- [71] Sarami S.: Development and Evaluation of a Semi-active Suspension System for Full Suspension Tractors, Doctoral thesis, TU Berlin, 2009.
- [72] Scarlett, A.J. et al: Whole-body vibration on agricultural vehicles, Research report, Silsoe Research Institute and RMS Vibration Test Laboratory for the Health and Safety Executive, Silsoe, 2005.
- [73] Schlotter V.: Einfluss dynamischer Radlastschwankungen und Schräglaufwinkeländerungen auf die horizontale Kraftübertragung von Ackerschlepperreifen, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005.
- [74] Schmeitz A. J. C.: A Semi-Empirical Three-Dimensional Model of the Pneumatic Tyre Rolling over Arbitrarily Uneven Road Surfaces, Doctoral thesis, Delft University of Technology, 2004.
- [75] Schumacher A.: Ein generisches Reifenmodell für Fahrdynamiksimulationen von Offroad-Fahrzeugen, Dissertation, TU Carolo-Wilhelmina Braunschweig, Braunschweig, 2009.
- [76] Seferović E., Bašić H.: Osnovi metrologije i obrade rezultata merenja, Mašinski fakultet Sarajevo, 2005.
- [77] Sharma, A. K., Pandey, K. P.: The Deflection and Contact Characteristics of Some Agricultural Tyres With Zero Slnkage, Journal of Terramechanics, 33(1996)6, 293-299
- [78] Sharon I.: Untersuchungen über die Schwingungseigenschaften großvolumiger Niederdruckreifen, Dissertation, TU Berlin, 1975.
- [79] Simić D.: Dinamika motornih vozila, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- [80] Simikić M.: Istraživanje podloga za povećanje energetske efikasnosti traktora, disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, 2011.
- [81] Stojić, B.: Using Neural Networks as a "Black Box" Approach for System Modelling in Automotive Engineering, Proceedings of the VIth International Symposium "Young People And Multidisciplinary Research", rad A3, Rumunija – Temišvar, 2004.
- [82] Stojić, B., Muzikravić, V., Poznanović, N.: Analiza mogućnosti primene neuronskih mreža za modeliranje amortizera motornih vozila, Zbornik radova sa XIII međunarodnog naučnog simpozijuma "Motori i motorna vozila 2004", Kragujevac, 2004., 61-71
- [83] Stojić, B., Pracny, V.: Shock Absorber Dynamic Behavior Modelling Taking into Account a "Memory - Effect" in Adams Software, 10th EAEC European Automotive Congress, rad RG05, Beograd, 2005.
- [84] Stojić B.: Primena neuronskih mreža za modeliranje dinamičkog ponašanja amortizera motornih vozila, magistarska teza, Univerzitet u Novom Sadu, 2005.
- [85] Stojić B., Poznić A., Časnji F.: Test Facility for Investigations of Tractor Tire Dynamic Behavior on Hard Surfaces, 39th International Symposium: „Actual Tasks on Agricultural Engineering“, Opatija, 2011., 119-127
- [86] Stojić B., Poznanović N., Poznić A.: Study of Tractor Tire Vertical Dynamics When Rolling Over Short-Wavelength Road Undulations and Impact Obstacles,

- International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, Kragujevac, 2012., 417-425
- [87] Stojić B., Poznić A., Časnji F.: Preliminary Testing of Tractor Tire Vibration Characteristics on New Test Facility, 40th International Symposium: „Actual Tasks on Agricultural Engineering“, Opatija, 2012., 195-203
- [88] Stojić B., Poznić A., Poznanović N.: Considerations on Ground Profile Shape for Tractor Tire Test Facility, 7th International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Balatonfüred, 2012., 425-430
- [89] Stojić B., Poznanović N., Poznić A.: Tire Enveloping Behavior on 3D Surfaces as Basis for Excitation of Simple Vertical Dynamics Tire Model, 41th International Symposium: „Actual Tasks on Agricultural Engineering“, Opatija, 2013., 131-140
- [90] Uys P. E., Els P. S., Thoresson M.: Suspension settings for optimal ride comfort of off-road vehicles travelling on roads with different roughness and speeds, Journal of Terramechanics 44 (2007), 163–175
- [91] Veelenturf L.P.J.: Analysis and Applications of Artificial Neural Networks, Prentice Hall International, Hertfordshire, 1995.
- [92] Wallentowitz H.: Vertikal- / Querdynamik von Kraftfahrzeugen, Institut für Kraftfahrwesen RWTH Aachen, 1996.
- [93] Witzel, P., Böttinger, S.: Upgrading of the Hohenheim Tyre Model to a radial approach for the simulation of obstacle passages, VDI Berichte Nr. 2124, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2011., 431-437
- [94] Wong J. Y.: Effect of Vibration on the Performance of Off-Road Vehicles, Journal of Terramechanics, 8(1972)4
- [95] Wong J. Y.: Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons Inc., New York Toronto 2001.
- [96] Wong: Terramechanics Engineering, Butterworth-Heinemann, 2009
- [97] Wulfsohn, S.K., Upadhyaya, W.J.: Tractive Characteristics of Radial Ply and Bias Ply Tyres in California, Journal of Terramechanics 25(1988)2, 111-134
- [98] Zegelaar P. W. A.: The Dynamic Response of Tyres to Brake Torque Variations And Road Unevennesses, Doctoral thesis, Delft University of Technology, 1998.
- [99] Хачатуров А.А.: Динамика системы дорога - шина - автомобиль – водитель, Машиностроение, 1976.
- [100] Korisničko uputstvo za program SNNS, www.ra.cs.uni-tuebingen.de/SNNS/, pristup 15. 10. 2003.
- [101] Korisničko uputstvo za program JavaNNS, <http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/software/JavaNNS/manual/JavaNNS-manual.pdf>, pristup 21. 8. 2011.
- [102] Katalog poljoprivrednih pneumatika Kléber, 1990.

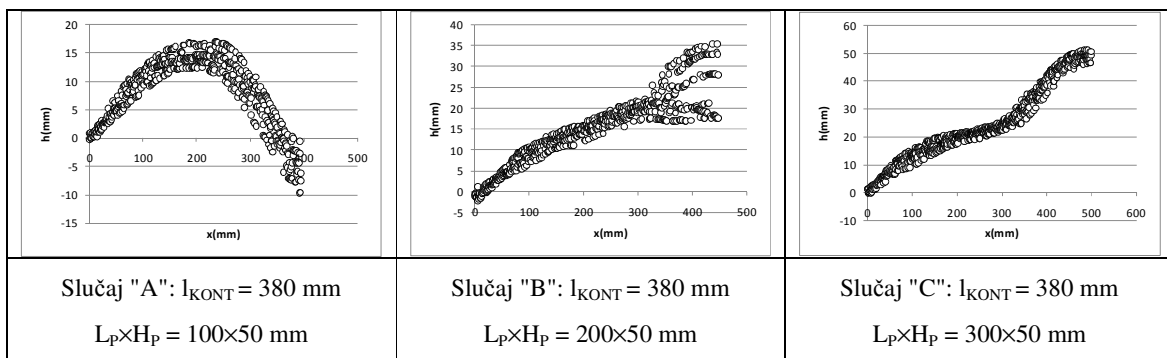
PRILOG 1. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA KVAZISTATIČKOG ODZIVA PNEUMATIKA

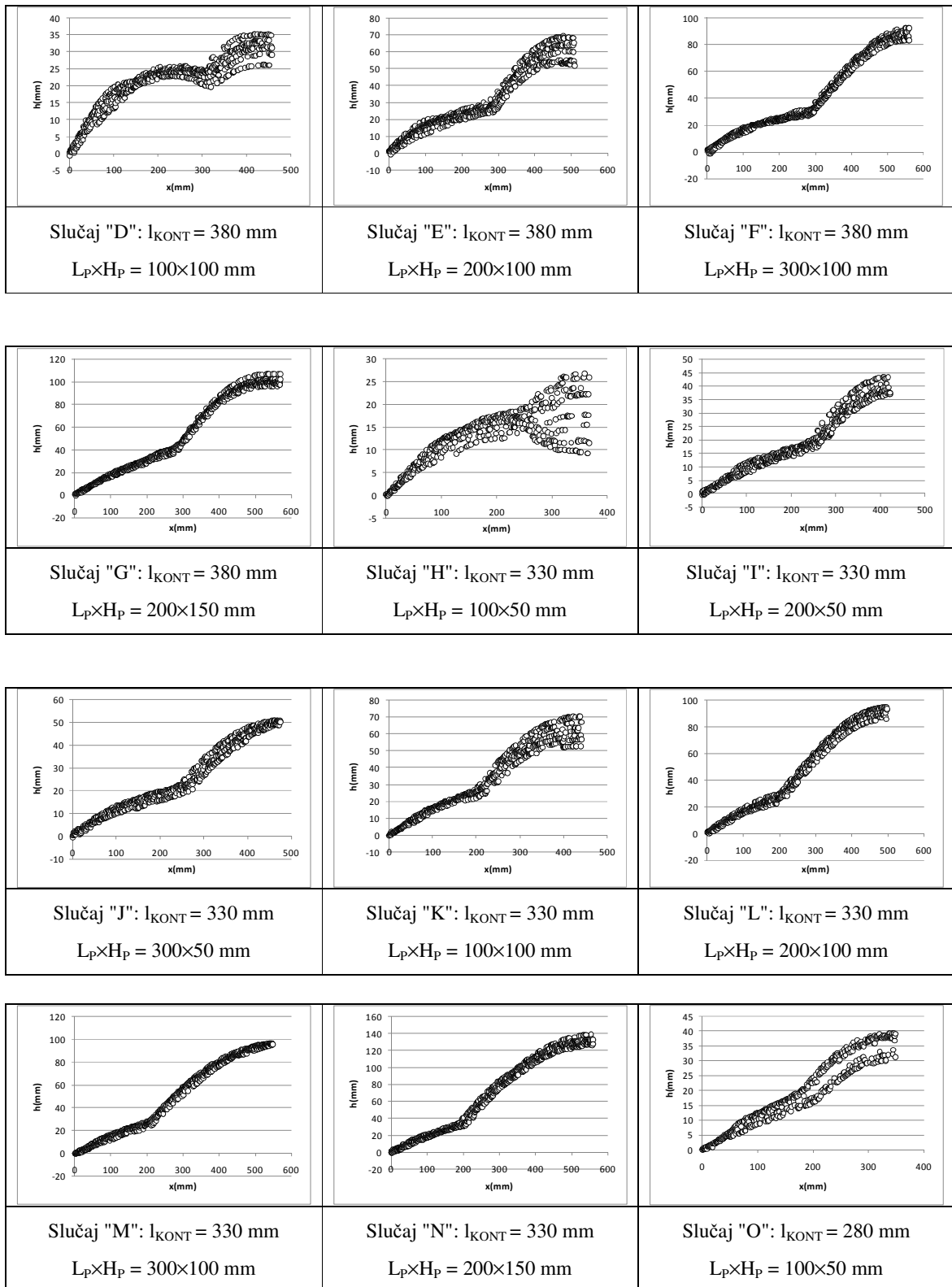
U prilogu su prikazani rezultati eksperimentalnih merenja – utvrđivanja oblika krivih kvazistatičke envelope pri prelasku točka preko singularnih prepreka pravougaonog poprečnog preseka različitih dimenzija. Parametri koji karakterišu dimenzije pravougaonog preseka prepreka su dužina (L_P) i visina (H_P). Takođe, pri merenjima je varirana dužina kontakta između pneumatika i ravne podloge (l_{KONT}) koja, kako je pokazano u radu, može da se usvoji kao jedinstveni pokazatelj eksploatacionih parametara pneumatika. U prikazu koji sledi, odgovarajuće vrednosti parametara l_{KONT} , L_P i H_P pri pojedinim merenjima date su ispod svake od eksperimentalnih krivih.

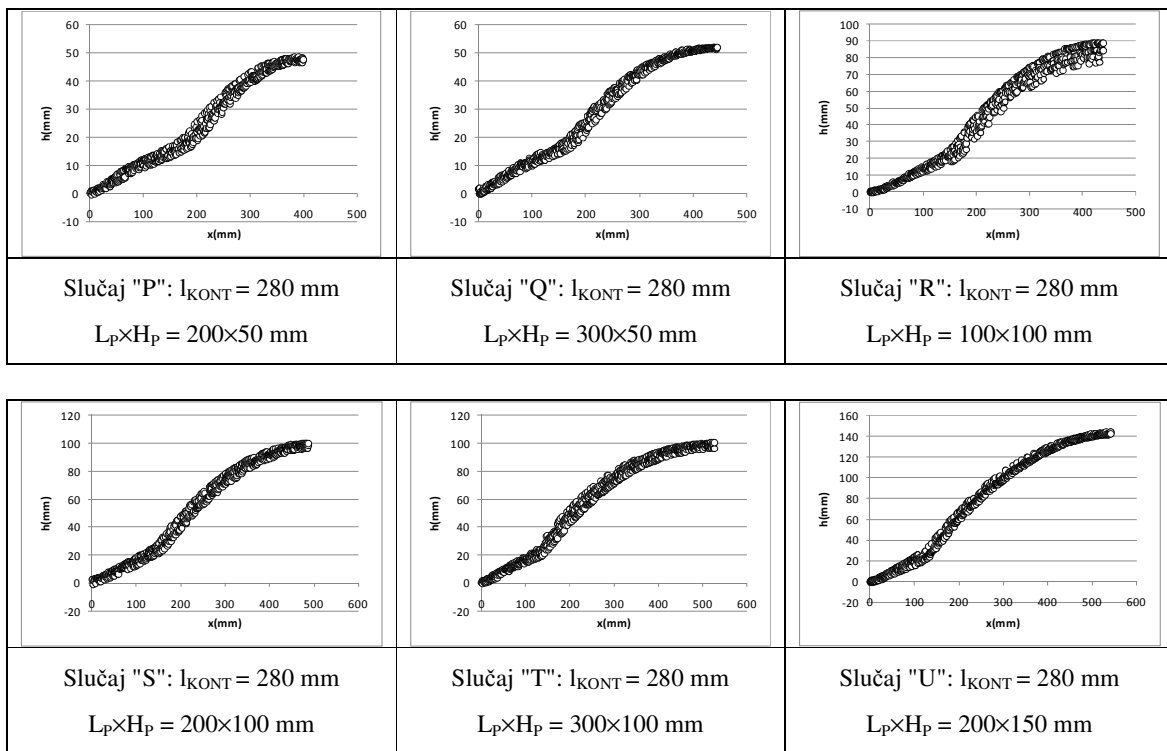
Krive kvazistatičke envelope su prikazane na dijagramima tako da horizontalna osa označava uzdužni položaj centra točka x u [mm] a na vertikalnoj osi je vrednost odgovarajuće visine efektivnog mikroprofila podloge h , takođe u [mm].

Merenja su, zbog kompenzacije rasipanja, vršena po 10 puta za svaku od korišćenih kombinacija uticajnih parametara l_{KONT} , L_P i H_P . Rezultati merenja pokazuju da postoje rasipanja rezultata čiji se nivo razlikuje u pojedinim slučajevima. Uočava se da su rasipanja intenzivnija što je kontaktna dužina veća (odnosno – pri datom vertikalnom opterećenju – pritisak niži) i što je odnos L_P / H_P manji. Ovo odgovara pretpostavci da su rasipanja u pretežnoj meri uzrokovana viskoelastičnim karakterom elastomera sadržanog u fizičkoj strukturi pneumatika, koji je tim veći što je pritisak niži (povećanje udela strukturne krutosti u odnosu na pneumatsku) i što su lokalne deformacije strukture izraženije (što odgovara slučaju manjih odnosa visine i dužine – L_P / H_P). Pored toga, na postojanje rasipanja takođe mogu uticati odsupanja okruglosti samog pneumatika, stohastički karakter ugaonog položaja rebara pri nailasku na prepreku i rasipanja u njihovom geometrijskom obliku, nehomogenost materijala, radijalne fluktuacije krutosti pneumatika itd.

GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MERENJA







PRILOG 2. CD-ROM SA PRILOZIMA

Priloženi CD-rom sadrži:

1. Elektronsku verziju teksta disertacije
2. Proračun linearizovanih parametara krutosti i prigušenja elastične strukture pneumatika pomoću programa za tabelarne kalkulacije MS-Excel®
3. Kod programa za implementaciju fizičkog modela pneumatika zasnovanog na sistemu radijalnih i međuradijalnih opruga u programskom jeziku Matlab®
4. Primer koda programa za poluautomatsko generisanje obrazaca za obuku veštačkih neuronskih mreža u programskom jeziku C
5. Prikaz dijagrama greške veštačkih neuronskih mreža u funkciji broja koraka obuke
6. Kodove programa za implementaciju modela envelope kretanja zasnovanog na veštačkoj neuronskoj mreži i integrisanog dinamičkog modela pneumatika u programskom jeziku Matlab®