

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Bakalářská práce

**Stanovení velikosti styčné plochy trakční zemědělské
pneumatiky**

Jiří Pohan

© 2019 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Pohan

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Stanovení velikosti styčné plochy trakční zemědělské pneumatiky

Název anglicky

Size assessment of traction agricultural tyre contact area

Cíle práce

Cílem práce je vytvořit ucelený přehled metod pro výpočet a stanovení velikosti styčné plochy pneumatiky s ohledem na velikost kontaktních tlaků ve stykové ploše pneumatiky. Dílčím cílem práce bude porovnání dříve publikovaných přístupů ke stanovení velikosti styčné plochy pneumatiky pro definované kombinace zatížení a tlaku huštění s ohledem na deformaci stykové plochy.

Metodika

Metodika:

1. Vypracování literární rešerše na základě doporučené vědecké literatury a dalších technických podkladů.
2. Na základě metodiky budou přehodnoceny nominální katalogové parametry pneumatik s ohledem na zobecnění vztahu výpočtu styčné plochy pneumatiky.
3. Praktická činnost bude spočívat ve vyhodnocení charakteristické deformace stykové plochy vybrané trakční zemědělské pneumatiky v závislosti na změně zatížení a tlaku huštění.
4. V diskuzi bude proveden rozbor a zhodnocení získaných podkladů v kontextu současné technické úrovně zemědělských vozidel.
5. Závěrečná část práce bude obsahovat možná doporučení autora

Doporučený rozsah práce

45

Klíčová slova

zemědělské pneumatiky, styčná plocha, tlak huštění, zatížení pneumatiky, střední kontaktní tlak

Doporučené zdroje informací

Crolla D.A. Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body. 1th. Ed. 850s. Butterworth-Heinemann 2009. ISBN: 978-3895783715.

Grečenko A. Vlastnosti Terénních Vozidel. 118s. VŠZ 1994. ISBN: 80-213-0190-2.

Karafiath L.L., Nowatzki E.A. Soil Mechanics for Off-Road Vehicle Engineering. 1th Ed. 516s. Trans Tech Publications 1978. ISBN: 0-87849-020-5.

Wong J.Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, 2nd Ed: Terrain Behaviour, Off-Road Vehicle Performance and Design. 488s. Wiley 2009. ISBN: 978-0750685610.

Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles. 4th Ed. 592s. Wiley 2008. ISBN: 978-0470170380.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Patrik Prikner, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 17. 1. 2017

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Stanovení velikosti styčné plochy trakční zemědělské pneumatiky" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2019

Poděkování

Rád bych touto cestou věnoval poděkování Ing. Patriku Priknerovi, Ph.D. za jeho cenné rady a podporu při psaní této bakalářské práce.

Stanovení velikosti styčné plochy trakční zemědělské pneumatiky

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na vytvoření přehledu metod pro stanovení velikosti styčné plochy trakční zemědělské pneumatiky. V úvodu práce je shrnutí základního rozdělení zemědělských pneumatik a nových technologií. Pro vytvoření uceleného přehledu byly zkoumány teoretické i experimentální modely odhadu kontaktních ploch pro statické i dynamické zatížení. Zmíněn byl také rozdílný postup při výpočtu kontaktních ploch na tvrdé a měkké podložce. Pro lepší představu byly uvedeny teoretické i experimentální příklady stanovení kontaktních ploch z dříve zveřejněných výzkumů. U experimentálních výzkumů byly uvedeny nové postupy zjištění kontaktních ploch s použitím digitálních snímků. Porovnání hodnot zveřejněných výrobcí s hodnotami vypočtenými nebo změřenými ukázalo přesnost a rozdíly hodnot v závislosti na různých parametrech. Zkoumáním vzájemného vlivu různých parametrů pneumatik na velikost kontaktních ploch bylo zjištěno, že největší vliv na velikost styčné plochy pneumatiky má její tlak huštění a svislé zatížení. Srovnáním teoretických a experimentálních metod byla zjištěna obecně vyšší přesnost metod experimentálních.

Klíčová slova: zemědělské pneumatiky, styčná plocha, tlak huštění, zatížení pneumatiky, střední kontaktní tlak

Size assessment of traction agricultural tyre contact area

Abstract

This work is focused on creating an overview of methods determining the size of contact area of agricultural traction tyres. In the introduction, there is a summary of the basic types of agricultural tyres and new technologies. The theoretical and experimental models of contact surface estimation for both static and dynamic loading were investigated to create a comprehensive overview. Also mentioned was a different procedure for calculating contact areas on a hard and soft soil. For better understanding, both theoretical and experimental examples of contact area determination from previously published research were presented. In experimental research, new techniques for detecting contact areas using digital images were presented. Comparison of values published by manufacturers with values calculated or measured showed accuracy and differences in values depending on different parameters. By examining the influence of different tyre parameters on the size of the contact areas, it has been found that the inflation pressure and the vertical load have the greatest influence on the size of the tyre contact area. By comparing theoretical and experimental methods, generally higher accuracy of experimental methods was found.

Keywords: agricultural tyres, contact area, tyre inflation pressure, tyre load, contact pressure in area of imprint

Obsah

1 Úvod.....	7
2 Cíl práce a metodika	8
3 Traktorové pneumatiky	9
3.1 Konstrukce pneumatik.....	9
3.2 Současné pneumatiky.....	11
4 Styčné plochy pneumatik.....	13
4.1 Metody výpočtů velikosti styčné plochy pneumatiky.....	13
4.1.1 Teoretické výpočty statických kontaktních ploch na tvrdé podložce	13
4.1.1.1 Výpočty styčné plochy podle všeobecných podmínek zatížení	17
4.1.2 Teoretické výpočty statických kontaktních ploch na měkké podložce.....	19
4.2 Metody měření styčné plochy pneumatiky	22
4.2.1 Experimentální zjištění velikosti statických kontaktních ploch.....	22
4.2.2 Experimentální zjištění velikosti dynamických kontaktních ploch	28
5 Závěr.....	32
6 Seznam použitých zdrojů	33
7 Přílohy	36
7.1 Seznam použitých obrázků.....	36
7.2 Seznam použitých grafů	36
7.3 Seznam použitých tabulek.....	37

1 Úvod

Většina úkonů v zemědělství využívá traktor jako zdroj síly k tahání různých nástrojů. Těžší nástroje ovšem vyžadují větší a výkonnější traktory. Zvyšování hmotnosti traktorů má však za následek nežádoucí zhutňování zemědělské půdy způsobené právě provozem těchto těžkých strojů na polích. Pneumatiky strojů tlačí na půdu a stlačují jednotlivé částice půdy dohromady. U značně zhutněných půd dochází k vytváření špatně propustné vrstvy půdního horizontu, což vede ke strukturálním, fyzikálním, biologickým ale i chemickým změnám.

K minimalizaci tohoto nežádoucího zhutnění půdy vede několik možností. Jednou z možností, jak snížit nežádoucí tlak na půdu je nižší zatížení náprav stroje nebo zvětšení kontaktních ploch mezi pneumatikami a půdou. Výrobci zemědělských strojů i výrobci pneumatik se s těmito problémy potýkají již desítky let. Snížení hmotnosti traktorů je vzhledem k jejich rostoucímu výkonu bohužel složité. Dosáhnout větších kontaktních ploch však lze zvětšením rozměrů pneumatik a jejich správným huštěním. Zvětšení kontaktní plochy vede také ke snížení prokluzu kol, což se pozitivně projeví v celkové efektivitě využití výkonu traktoru a na jeho spotřebě paliva.

Aby bylo možné globálně minimalizovat riziko zhutnění půdy, je nutné vytvořit metodiku zjištění styčných ploch pneumatik. Pro výrobce a provozovatele zemědělské techniky jsou tato data nepostradatelným nástrojem pro správný výběr obutí, které přispěje k minimalizaci poškození půdy. Zjištění kontaktních ploch je však složitý a komplexní proces, využívající matematických, či experimentálních metod.

2 Cíl práce a metodika

Cílem práce je vytvořit ucelený přehled metod pro výpočet a stanovení velikosti styčné plochy pneumatiky s ohledem na velikost kontaktních tlaků ve stykové ploše pneumatiky.

Dílčím cílem práce bude porovnání dříve publikovaných přístupů ke stanovení velikosti styčné plochy pneumatiky pro definované kombinace zatížení a tlaku huštění s ohledem na deformaci stykové plochy.

3 Traktorové pneumatiky

Pneumatiky slouží jako první pružící prvek vozidla. Přenášejí také hmotnost traktoru, hnací a brzdné momenty a boční síly na kontaktní podložku.

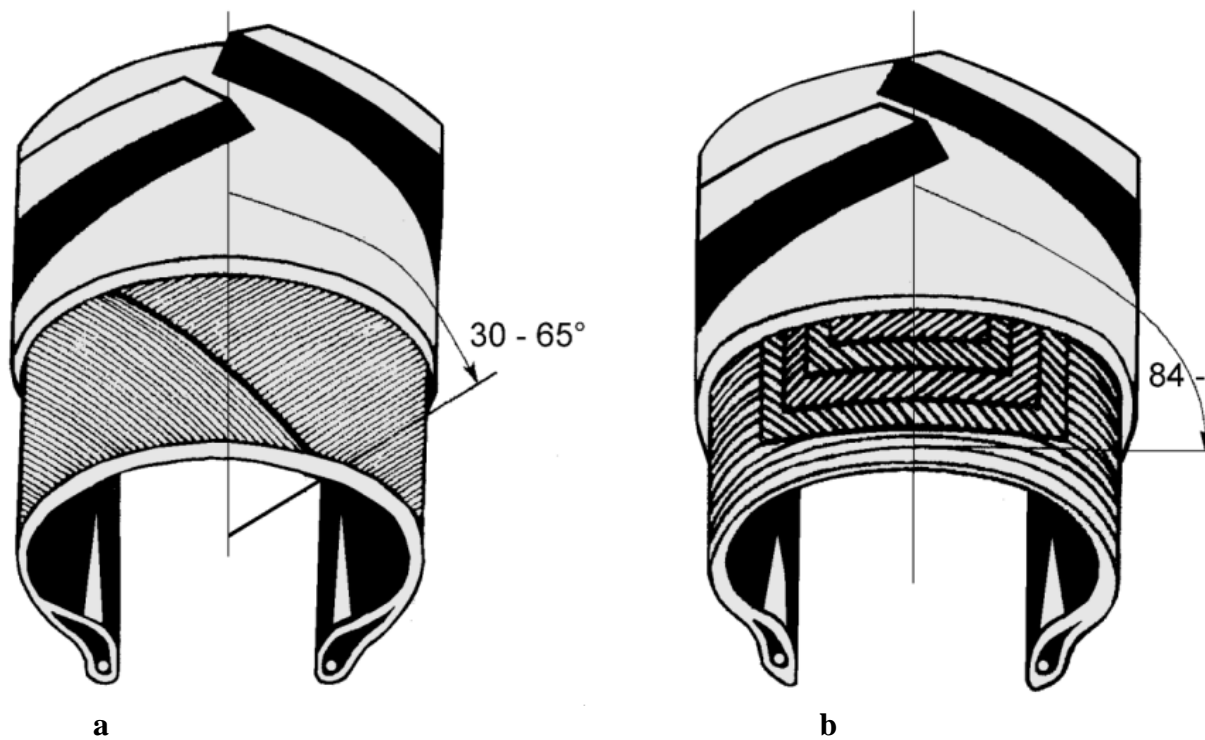
Pneumatiku lze také nazvat pláštěm, případně pláštěm s duší. Plášť je vnější částí pneumatiky a zajišťuje kontakt s podložkou. Patka pláště dosedá na ráfek. Bezdušové pneumatiky mají vzduchotěsný plášť a ten přebírá funkci duše.

Mezi hlavní komponenty pneumatiky patří pryž (80–85 %), různá vlákna (12–16 %) a ocelový drát (2–3 %). Mezi další přísady patří saze, oleje, textilie, různé chemikálie a další suroviny. Pneumatika se skládá z běhounu, kostry, bočnic, patky a nárazníkové vrstvy (BAUER., 2013).

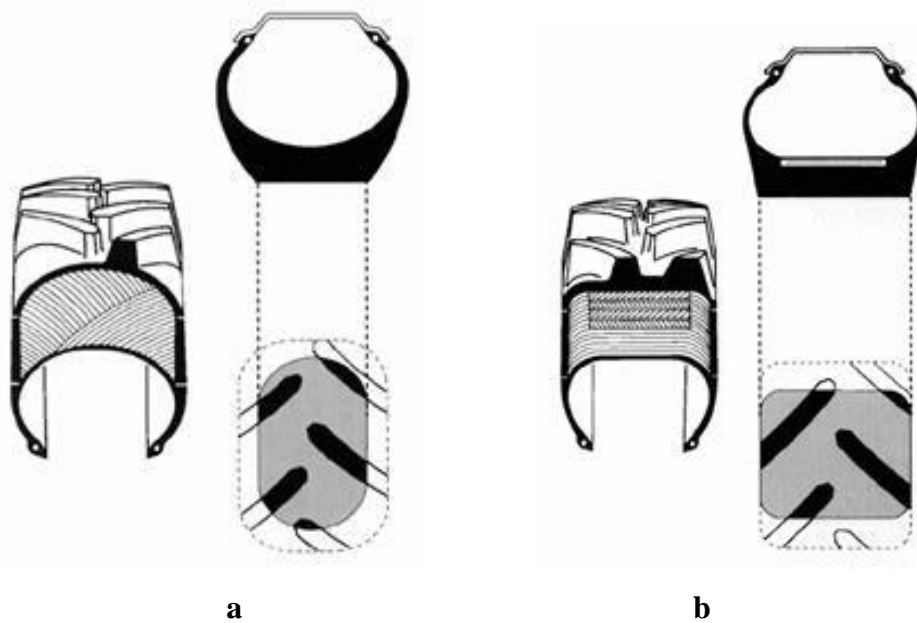
Nosnou částí pneumatiky je běhoun. Běhoun je zhotoven z odolného materiálu, který dobře odolává opotřebení. Profilováním běhounu se vytvoří vzorek pneumatiky. Díky vzorku dosahuje pneumatika kvalitnějšího kontaktu s podložkou. Vzorek přímo ovlivňuje vlastnosti pneumatiky a má vliv na velikost prokluzu, záběrové vlastnosti, hloubku stopy a kontaktní tlaky na podložku. Běhoun po stranách přechází v bočnice a patky. Od kostry je běhoun oddělen nárazníkovou vrstvou, která tlumí nárazy a chrání kordové vrstvy kostry. (SEMETKO, 1985)

3.1 Konstrukce pneumatik

Největší vliv na vlastnosti pneumatiky má však konstrukce kostry. Pláště lze rozdělit podle konstrukce kostry na radiální a diagonální. Dnes se ve většině případů používají pláště radiální konstrukce. U radiálních plášťů jsou kordové nitě v kostře uspořádány napříč, od patky k patce, pro vyšší stabilitu kostry je v obvodovém směru ještě několik vrstev nárazníku. Díky nárazníku je běhoun pevným základem pneumatiky, boky pneumatiky jsou však velmi pružné. Díky tomu poskytují radiální pneumatiky větší komfort při jízdě. Radiální pneumatiky mají v průměru o 20–25 % větší styčnou plochu oproti diagonálním pneumatikám. Díky tomu je možné účinněji přenést působící síly a méně tak zatížit půdu (JURTÍK, 2006).



Obr. 1 Uspořádání kostry pneumatiky (a) diagonální, (b) radiální (Good year tyre-technical manual)



Obr. 2 Znáornění tvarů styčné plochy diagonální (a) a radiální (b) pneumatiky (storex.comin.cz)

3.2 Současné pneumatiky

Již od roku 1918, kdy společnost International Harvester Co. vybavila traktor koly opatřeny gumovými bloky můžeme pozorovat vývoj zemědělských pneumatik. Od té doby se rozvoj pneumatik posunul kupředu a již v 50 letech minulého století bylo dle odhadů až 100 % prodaných traktorů v USA vybaveno vzduchem huštěnými pneumatikami. (<https://www.tirereview.com/the-evolution-of-ag/>). Vzduchem huštěné pneumatiky poskytují vyšší komfort a zároveň velmi dobré trakční vlastnosti. Z počátku diagonální, později již radiální pneumatiky byly osazeny nejen na traktory, ale i další zemědělské stroje. Se zvýšeným výkonem, a hlavně hmotností strojů však bylo potřeba pneumatiky dále vylepšit, aby bylo možné bezpečně přenést vysoký výkon a hmotnost strojů.

Moderní radiální pneumatiky jsou často navrženy tak, aby byly schopné provozu při nižším tlaku huštění. Snížení tlaku huštění vede ke zvětšení kontaktní plochy, čímž se zlepšují nejen trakční vlastnosti traktoru, ale dochází hlavně k lepší distribuci tlaku na půdu, a tedy menšímu ztuhování půdy. Například společnost Michelin přišla na trh s pneumatikami řady Ultraflex, které využívají nový typ plášťového profilu s větší ohebností bočnic. Pneumatiky lze tedy provozovat s větším stupněm deflexe bez negativních dopadů na životnost pneumatiky. Pneumatiky jsou vhodné pro traktory vybavené technologií centrálního huštění pneumatik. Pomocí tohoto systému lze jednoduše snížit pracovní tlak pneumatik po přesunu na pole.



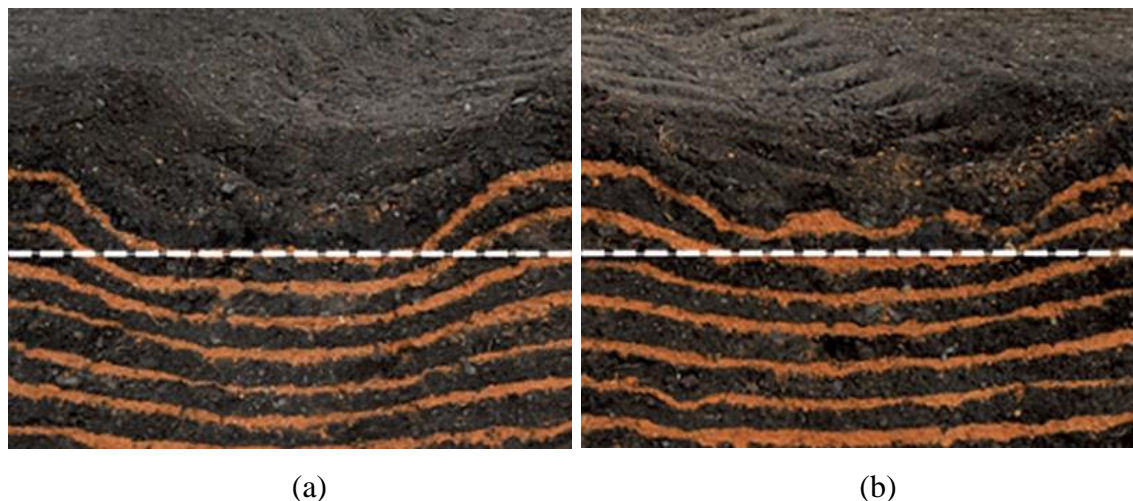
*Obr. 3 Traktor Massey Ferguson 6616 s pneumatikami Michelin Ultraflex Technology
(www.agriland.ie)*

Výrobce Michelin například u pneumatik Michelin XEOBIB VF 650/60 R38 slibuje až o 24% větší styčnou plochu oproti standartní radiální pneumatice Michelin 65 SERIES 600/65 R38. Pro tyto dvě pneumatiky výrobce uvádí také doporučené hodnoty tlaku huštění pro zátěž 3629 kg (8000 lbs):

Pneumatika	Tlak huštění
Michelin XEOBIB VF 650/60 R38	89.6 kPa (13 PSI)
Michelin 65 SERIES 600/65 R38	158.5 kPa (23 PSI)

Tab. 1 Doporučené hodnoty tlaku huštění (<https://agricultural.michelinman.com>)

Toto snížení tlaku se projeví na snížení rizika zhutnění půdy, což je znázorněno na Obr. 4, zveřejněném výrobcem Michelin.



Obr. 4 Rozdíl ve zhutnění půdy mezi pneumatikami Michelin 65 series (a) a Michelin XEOBIB (b) při stejném zatížení – 3629 kg (<https://agricultural.michelinman.com>)

4 Styčné plochy pneumatik

Styčnou plochou pneumatiky se rozumí plocha kontaktu pneumatiky s podložkou. Velikost a tvar styčné plochy pneumatik ovlivňuje trakční vlastnosti traktoru, valivý odpor, spotřebu paliva, ale i charakter a rozložení kontaktního tlaku na půdu. Deformace pneumatik na tvrdém povrchu je ovlivněna rozměry pneumatik, tuhostí kostry, konstrukcí vzorku, tlakem huštění a zatížením náprav. Vlastnosti pneumatik na deformovatelné půdě jsou do určité míry určeny pevností půdy. Kontaktní plocha povrchu pneumatiky definuje intenzitu aplikovaného tlaku na podložku (SHARMA., PADNEY., 1996). Tlak přenesený do půdy závisí nejvíce na zatížení a styčné ploše, proto je velmi důležité odhadnout styčné plochy přesně.

4.1 Metody výpočtů velikosti styčné plochy pneumatiky

Rovnic a metod pro výpočet styčné plochy pneumatiky ať už na tvrdé, nebo na měkké podložce vzniklo již mnoho. Problematice se věnují odborníci už od 50. let minulého století. Pro ujasnění přehledu metod zjištění kontaktní plochy byly stanoveny modely. Modely kontaktních ploch jsou experimentální, experimentálně – výpočetní, nebo jen výpočetní, tedy teoretické. Dále je vhodné rozlišit mezi statickými a dynamickými modely kontaktních ploch a zároveň je vhodné rozlišit měkkou a tvrdou podložku.

4.1.1 Teoretické výpočty statických kontaktních ploch na tvrdé podložce

Nejjednodušší teoretické postupy pracovaly s předpokladem, že kontaktní plochy pneumatik mají tvar kružnice, čtverce nebo elipsy. Pozdější studie prokázaly, že kontaktní plocha nemá tvar kružnice ani čtverce, ale spíše se podobá elipse. Tato zjištění přiměla odborníky vytvořit vylepšené modely výpočtů předpokládající elipsoidní tvary. Tyto modely pak lépe simulují reálné vlastnosti styčné plochy. Styčná plocha čtvercového, nebo obdélníkového tvaru by měla dle základní geometrie kontaktní plochu rovnou součinu délky a šířky otisku. Plocha otisku kruhového tvaru by byla rovna obsahu kruhu. Jak již bylo zmíněno, otisky pneumatik se však spíše podobají elipse. Pro výpočet eliptických tvarů je tedy nutné rovnice upravit. Nejčastější a jednoduchou úpravou rovnic je přidání opravného koeficientu. Pro nejpřesnější výsledky je nutné zahrnout více parametrů, například stupeň deflexe či kontaktní tlak. Díky tomu jsou teoretické modely většinou složité a jejich zjednodušením může dojít ke snížení přesnosti výsledků.

Teoretické modely a výpočetní postupy jsou nejčastěji založené na přepočtech z rozměrů pneumatik a jejich vlastností. Základem je změřit, či vyčíst z katalogu parametry zkoumané pneumatiky jakými jsou celkový průměr, průměr disku, výška bočnice, šířka pneumatiky v řezu a tlak huštění. Katalogy výrobců dále uvádějí jmenovité zatížení pro určitý tlak huštění v rámci dané pojezdové rychlosti. Při dodržení doporučeného tlaku huštění a jmenovitého zatížení je pneumatika provozována v bezpečném režimu s přijatelným stupněm deflexe. Pro takové podmínky je v katalozích často uvedena i odhadovaná velikost kontaktní plochy pneumatiky vypočtená právě při statickém zatížení na tvrdém povrchu. Tyto hodnoty jsou pro definované proměnné dostatečně přesné, ale nelze jich využít, budeme-li pneumatiku provozovat na stroji s jiným, než uvedeným zatížením. Pro takové situace je proto důležité nalézt spolehlivou metodu výpočtu kontaktních ploch v závislosti na tlaku huštění a svislém zatížení. Hodnoty od výrobce je pak možné použít pro srovnání výsledků a také jako výchozí bod výpočtů.

Pro složitost a komplexnost teoretických výpočtů ploch je vhodné uvést kompletní postup výpočtu, jako názorný příklad. Teoretický výpočetní model již respektující elipsoidní tvary uvedl Grečenko (1995), který zkoumal několik možných rovnic a výpočtových metod pro stanovení velikosti statické styčné plochy na tvrdé podložce. Stanovil, že styčná plocha A_o (cm²), je plocha obálky kolem otisku běhounu pneumatiky. Základními rozměry styčné plochy jsou její délka l_o (cm) a její šířka b_o (cm). Přibližnou hodnotu styčné plochy lze tedy vypočítat pomocí rovnice:

$$A_o = k \cdot \frac{l_o}{2} \cdot \frac{b_o}{2} \quad (1)$$

kde figuruje opravný koeficient k , jenž získáme ze vztahu:

$$k = \frac{4A_{om}}{l_o \cdot b_o} \quad (2)$$

Koeficient k definuje proporce otisku s měřenou plochou A_{om} (cm) a nabývá různých hodnot pro určité tvary styčných ploch:

$k = 3.14$ – elipsa

$3.14 < k < 4$ – ovál

$k = 4$ – čtverec

Grečenkova (1995) vlastní měření založená na principu vícenásobného otisku nabarveného běhounu ukázala, že běžný rozsah koeficientu k nabývá hodnot od 3.25 – 3.85, a že ani $k = 4$ není výjimečný. Naopak hodnoty $k < 3.14$ jsou spíše vzácné.

Plocha stopy pneumatiky závisí na následujících katalogových parametrech: šířka v řezu b_k , celkový průměr d_k , poloměr při statickém zatížení r_s a průměr ráfku d_r . Z těchto parametrů lze vypočítat další potřebné hodnoty:

$$\text{výška bočnice: } h_k = (d_k - d_r) / 2 \quad (3)$$

$$\text{poměr stran pneumatiky: } a = h_k / b_k = (d_k - d_r) / 2b_k \quad (4)$$

$$\text{nominální zátěžová deflexe: } f_{kj} = (d_k - 2r_s) / 2 \quad (5)$$

$$\text{procentuální nominální deflexe: } f_{kj}/h_k = (d_k - 2r_s) / (d_k - d_r) \quad (6)$$

V katalogích výrobců pneumatik jsou běžně uváděna jmenovitá zatížení W_j (kg) pro různé tlaky huštění p (kPa) při specifikované rychlosti, aby byla udržena přijatelná deflexe. Odpovídající jmenovité styčné plochy považované za stejné pro jakoukoliv kombinaci zatížení W_j ku tlaku huštění p budou označeny jako A_{oj} . Skutečné zatížení W při určitém tlaku p by se obecně lišilo od zatížení W_j a tvořilo by styčnou plochu A_o . Poměr zátěže je pak $\alpha_w = W/W_j$. Pokud vyjde, že $\alpha_w > 1$, bude pneumatika přetížená. Podobně lze určit poměr styčných ploch $\alpha_A = A_o/A_{oj}$.

Rovnice pro výpočty styčných ploch můžeme rozdělit do tří kategorií označených (a), (b) a (c).

(a) Na základě geometrických hledisek je jmenovitá plocha úměrná součinu průměru a šířky pneumatiky, projekční ploše.

$$A_{oj} = c \cdot d_k \cdot b_k \quad (7)$$

Tento vzorec je rozměrově homogenní, a pokud by rozměry d_k a b_k dosahovaly stejných hodnot, plocha A_{oj} by měla rozměr $(d_k \cdot b_k)^2$. Bezrozměrný koeficient c by pak dosahoval hodnot od 0.175 pro pneumatiky s malým stupněm deflexe, až do 0.27 pro pneumatiky na měkké podložce. Hodnota koeficientu c pro moderní pneumatiky s deflexí až 20 % je rovna 0.245. Po úpravě rovnice pro výpočet styčné plochy na základě průřezu eliptické křivky s rovinou ve vzdálenosti f_k od obvodu pneumatiky lze získat rovnici:

$$A_{oj} = 1.57 \cdot (d_k - 2r_s) \cdot (d_k \cdot b_k)^{1/2} \quad (8)$$

(b) Na základě experimentálně stanoveného vztahu dvou bezrozměrných podmínek podle, lze zapsat rozměrovou analýzu se třemi π výrazy:

$$\frac{A_o}{b_k \cdot d_k} = f \cdot \left(\frac{p \cdot V}{W \cdot h_k} \right) \quad (9)$$

Kde V (dm^3) vyjadřuje objem pneumatiky – existují pouze grafická znázornění.

Rozměrová analýza se čtyřmi π výrazy:

$$\frac{A_o}{h_k^2} = 8 \frac{f_k}{h_k} \quad \text{nebo} \quad A_o = 8f_k \cdot h_k \quad (10)$$

Nominální plocha s deflexí $f_k = f_{kj}$ za použití rovnic (4, 6) je pak:

$$A_{oj} = 8f_{kj} \cdot h_k = 2 \cdot (d_k - 2r_s) \cdot (d_k - 2.54 \cdot d_r) \quad (11)$$

Tato rovnice nepočítá s šířkou pneumatiky.

Regresní analýza normovaných výrazů kde $r_k = d_k/2$ je ve tvaru:

$$\frac{A_o}{b_k \cdot r_k} = 1.85 \cdot \left(\frac{f_k}{r_k} \right)^{2/3} \quad (12)$$

Tato rovnice je rozměrově homogenní, avšak udává spíše menší hodnoty plochy A_o pro terénní pneumatiky. Grečenko vyšel z rovnice (6) a navrhl úpravu, za předpokladu že $f_k = f_{kj}$. Rovnice je pak ve tvaru:

$$A_{oj} = 1.65 \cdot b_k \cdot [r_s \cdot (d_k - 2r_s)^2]^{1/3} \quad (13)$$

(c) Vzorce obecné platnosti založené na jiných postupech analyzují naměřené hodnoty (otisk pneumatiky) a přidávají linearizované hodnoty pro získání středního kontaktního tlaku p_m (jenž je funkcí tlaku huštění p a zatížení W). Kontaktní tlak poté slouží k výpočtu plochy otisku pneumatiky v cm^2 : $A_o = 10^2 \cdot W/p_m$. Tyto rovnice jsou však pro zjištění kontaktních spíše jen orientační,

Pro diagonální pneumatiky platí vztah:

$$A_o = \frac{98.1 \cdot W}{112.8 + 66.5 \cdot p + 0.833 \cdot 10^{-2} W - 0.4 d_k} \quad (14)$$

Pro radiální pneumatiky platí vztah:

$$A_o = \frac{98.1 \cdot W}{267.7 + 57.5 \cdot p + 1.08 \cdot 10^{-2} W - 1.6 d_k} \quad (15)$$

Kde W (kg), p (bar), d_k (cm). Šířka pneumatiky zde opět není brána v potaz (GREČENKO, 1995).

4.1.1.1 Výpočty styčné plochy podle všeobecných podmínek zatížení

Katalog pneumatik poskytuje pro každý uvedený hustící tlak specifikovanou jmenovitou hodnotu zatížení W_j podle rovnice (6) s užitím jmenovité delexe f_{kj} . Uplatnění konceptu hmotnostní tuhosti c_m závislé na tlaku huštění dostaneme (GREČENKO, 1995):

$$c_m = W_j / f_{kj} = W / f_k = \text{konstanta} \quad (16)$$

z toho vyplývá, že deflexi spočteme podle:

$$f_k = W / W_j \cdot f_{kj} = \alpha_w \cdot f_{kj} \quad (17)$$

kde W je skutečné zatížení.

Vztah (17) lze dosadit do předchozích rovnic (8, 10), kde se objeví opravný koeficient α_w .

V rovnici (12) se vyskytuje $f_k^{2/3}$, opravný koeficient se pak v rovnici (13) objeví $\alpha_A = \alpha_w^{2/3}$.

Obecně lze opravný koeficient styčné plochy α_A definovat:

$$\alpha_A = \alpha_w^n = (W / W_{kj})^n$$

kde exponent n nabývá hodnot mezi $\frac{2}{3}$ a 1 aby se dosáhlo nejlepší korekce.

Upravíme-li tímto opravným koeficientem rovnice (7, 8, 11, 13) dostaneme:

$$(7) - A_o = c \cdot \alpha_w^n \cdot d_k \cdot b_k; c = 0.245 \quad (18)$$

$$(8) - A_o = 1.57 \cdot \alpha_w^n \cdot (d_k - 2r_s) \cdot (d_k \cdot b_k)^{1/2} \quad (19)$$

$$(9) - A_o = 2 \cdot \alpha_w^n \cdot (d_k - 2r_s) \cdot (d_k - 2.54d_r) \quad (20)$$

$$(10) - A_o = c_1 \cdot \alpha_w^n \cdot b_k \cdot (r_s(d_k - 2r_s)^2)^{1/3}; c_1 = 1.65 \quad (21)$$

Grečenko (1995) tyto rovnice otestoval s parametry 3 různých pneumatik. V následujících tabulkách jsou uvedeny katalogové parametry a vypočtené hodnoty.

Případ číslo	Rozměr	Výrobce	b_k cm	d_k cm	r_s cm	d_r cm	p_j kPa	W_j kg
1	18.4 R38	Continental	46.7	175	80.3	96.5	140	2755
2	18.4 R38	Continental	46.7	175	80.3	96.5	80	1925
3	520/70 R38	GoodYear	51.6	174.5	79.6	96.5	120	2885
4	30.5 LR 32	GoodYear	76.5	181.6	80.7	81.3	60	3550

Tab. 2 Katalogová data od výrobců (GREČENKO, 1995)

Test číslo	Rozměr	n	Rovnice					Hodnoty výrobce	α_w
			(18)	(19)	(20)	(21)	(15)		
1	18.4 R38	2/3	1999	2041	2257	1965	2756	2020	0.998
	18.4 R38	1	1998	2040	2256	1964	2756	2020	0.998
2	18.4 R38	2/3	1967	2008	2221	1934	3409	1650	0.974
	18.4 R38	1	1950	1991	2201	1916	3409	1650	0.974
3	520/70 R38	2/3	2188	2261	2367	2239	3167	2460	0.988
	520/70 R38	1	2197	2251	2357	2230	3167	2460	0.988
4	30.5 LR32	2/3	3108	3414	3702	3695	6740	3220	0.873
	30.5 LR32	1	2972	3264	3539	3532	6740	3220	0.873

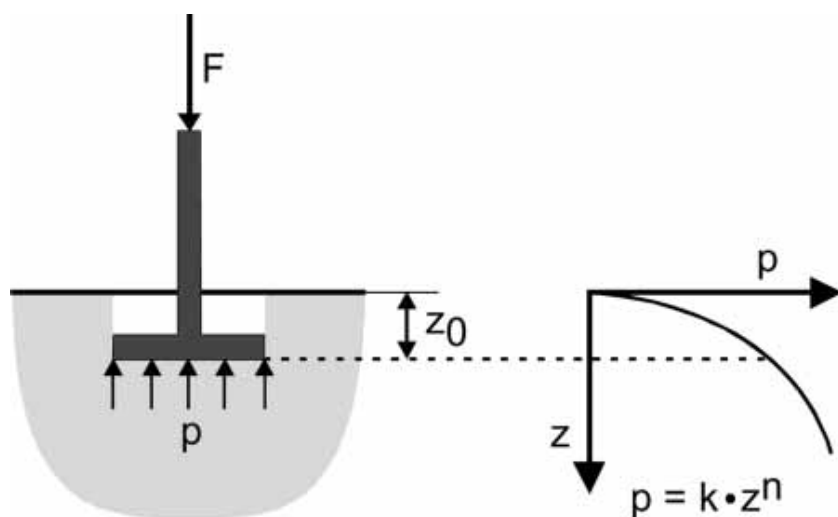
Tab. 3 Vypočtená velikost styčných ploch na základě různých rovnic, srovnání s hodnotami výrobce (GREČENKO, 1995)

Tabulka 4 obsahuje předpověděné hodnoty velikostí styčných ploch ve srovnání s příslušnými hodnotami poskytnutými výrobcem. Z výsledků vyplývá, že žádná z použitých rovnic nepřibližuje vypočtené hodnoty naměřeným bez určité chyby. Nicméně hodnoty od výrobců se také mohou lišit od skutečnosti. Nejbližší / nejvzdálenější hodnoty výsledků rovnic s použitím opravného koeficientu od hodnot výrobců byly tučně označeny. V tomto případě se jako nejvhodnější jeví rovnice (19) a (21). Rovnice obecné platnosti (15) byla výsledkům velmi vzdálená a dá se tedy označit za spíše orientační (GREČENKO, 1995; autorův překlad).

4.1.2 Teoretické výpočty statických kontaktních ploch na měkké podložce

Pro bližší přiblížení reálné situaci je vhodnější počítat velikost statické kontaktní plochy na měkké podložce. Kontaktní plochu pneumatiky na tvrdé podložce tvoří ve skutečnosti jen jednotlivé členy vzorku. V měkké půdě se však pneumatika obtiskne i plochou mezi členy vzorku. Půda se pod pneumatikou deformuje a vzniká zahloubení pneumatiky do půdy. Díky tomu se tvar styčné plochy změní, obvykle zvětší a kontaktní tlak je tedy rozložen na větší plochu. Při výpočtech je potřeba zohlednit i vlastnosti půdy. Deformovatelnost půdy lze změřit vtlačení kruhové desky do půdy, přičemž se měří síla F potřebná ke stlačení, kontaktní tlak p a zahloubení z . Vliv tlaku na zahloubení lze popsat takzvanou Bekkerovou rovnicí:

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n = kz^n$$



Obr. 5 Test vtlačení desky do půdy (HARNISCH et. al., 2005)

Z dnešního pohledu velkorozměrových pneumatik vytvořil Schwanghart (1991) již možná méně přesnou, nicméně přehlednou matematickou metodu pro výpočet styčné plochy pneumatik na měkké podložce. Podstatou jeho práce bylo změření vlastností otisků několika pneumatik na testovací platformě s půdou a poté vytvoření matematického modelu pro výpočet kontaktních ploch mezi pneumatikou a půdou. Schwanghartovi (1991) se povedlo vytvořit zjednodušený matematický postup, který ovšem dosahoval dobrých hodnot.

Schwanghart (1991) provedl výzkum za použití nádoby (25 x 2.5 x 0.5 m) s písčitou půdou. Pro test použil čtyři pneumatiky, které byly zatěžovány testovacím stojanem s pojezdem. Každou ze čtyř testovaných pneumatik zatížil a pár metrů odvalil. Otisknuté plochy za pomoci bílého prášku pro lepší vizualizaci překreslil na průsvitnou folii. Test

každé pneumatiky provedl čtyřikrát, pokaždé s jiným tlakem huštění a hodnotou svislého zatížení.

Pneumatika	Průměr (cm)	Šířka b (cm)	Koeficient pružnosti c_0 (kg/cm) pro tlaky hušť.			
			60	80	100	200 (kPa)
12.5/80-18	98.7	32.8	150	183	225	373
13.6/12-28	131	34.5	186	219	255	458
16.9/14-34	158.5	42.9	206	244	287	525
16.9/14-26	138.1	42.9	201	239	279	509

Tab. 4 Rozměry testovaných pneumatik (SCHWANGART, 1991)

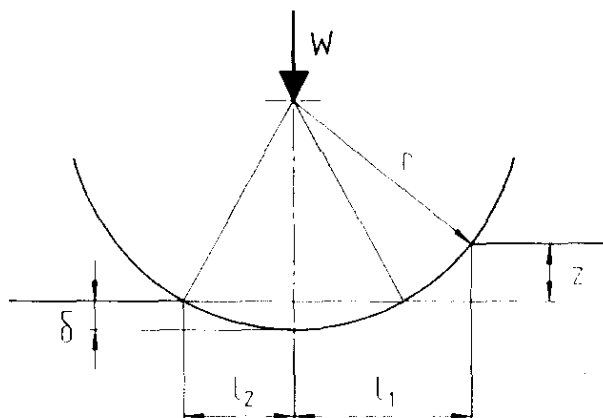
Dle Schwangharta (1991) jsou modely pro výpočet ploch na měkké podložce příliš složité, navrhl tedy použití zjednodušeného modelu za použití rovnic:

$$r^2 = l_1^2 + (r - \delta - z)^2 \quad (22)$$

$$l_1 = \sqrt{2r(z + \delta) - (z + \delta)^2} \quad (23)$$

$$l_2 = \sqrt{(2r\delta - \delta^2)} \quad (24)$$

$$l = l_1 + l_2 \quad (25)$$



Obr. 6 Geometrie pneumatiky v měkké půdě (SCHWANGHART, 1991)

Deformaci δ lze určit při použití koeficientu pružnosti c_0 při určitém tlaku huštění p_i za předpokladu, že 80 % zatížení působí na deformovanou plochu pneumatiky s délkou $2l_2$ a zbylých 20 % působí na plochu $l_1 - l_2$.

$$\delta = \frac{0.8W}{c_0} \quad (25)$$

Pro zjištění zhloubení z vyšel Schwanghart (1991) ze zjednodušených Bekkerových rovnic:

$$p = (k_c/b + k_\phi)z^n \quad (26)$$

$$k = k_c/(b + k_\phi) \quad (27)$$

$$z = (p/k)^{1/n} \quad (28)$$

$$p = W/A \quad (29)$$

$$A = bl \beta \quad (30)$$

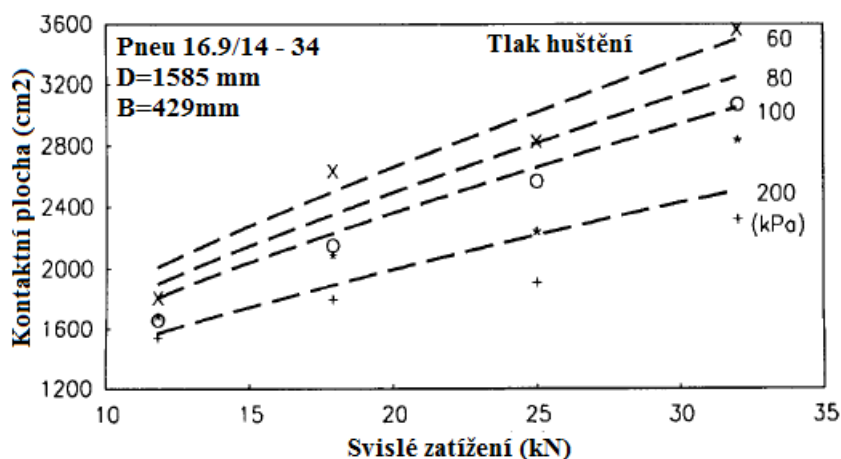
Opravný koeficient β zajišťuje lepší příměr k eliptickým tvarům kontaktní plochy. Jeho hodnoty se pro měřené pneumatiky pohybovali od 0.75 do 0.8.

Hodnota procentuálního zatížení I_w pro předepsané zatížení W_r při určeném tlaku huštění p_i je nutná pro výpočet rozdílu šířky b a předepsané šířky b_0 .

$$I_w = W/W_r \quad (31)$$

$$b = b_0 + b_1 I_w \quad (32)$$

$$\text{kde } b_1 = 3 \text{ až } 5 \text{ (cm/procentuální zatížení)} \quad (33)$$



Tab. 5 Změřené body kontaktních ploch s ohledem na svislé zatížení, přerušované křivky jsou vypočítané hodnoty (SCHWANGHART, 1991)

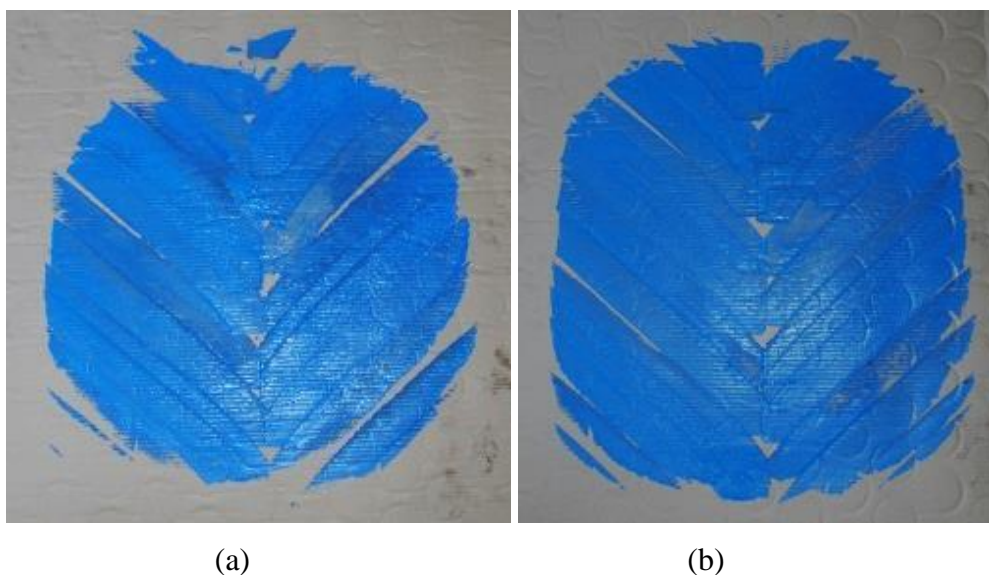
Z výsledků vyplývá, že při zvýšení svislého zatížení a snížení tlaku huštění roste kontaktní plocha. Naměřené body mají poměrně velký rozsah, ale rostoucí tendence je znatelná. Ačkoliv jsou rozměry testovaných pneumatik velmi odlišné, kontaktní plochy dosahují hodnot od 1400 – 2000 cm² pro zatížení 1200 kg a 2400 – 3200 cm² při zatížení 3200 kg. Zvýšení zatížení na dvojnásobnou hodnotu způsobilo 30 – 40 % nárůst styčné plochy, zatímco snížením tlaku huštění vzroste kontaktní plocha o 70 – 80 %. (SCHWANGHART, 1991)

4.2 Metody měření styčné plochy pneumatiky

4.2.1 Experimentální zjištění velikosti statických kontaktních ploch

Právě složitost a mnohdy snížená přesnost teoretických výpočtů vedla v s poslední době k většímu rozvoji experimentálních metod. Experimentální zjišťování kontaktních ploch v laboratoři dosahuje vyšší přesnosti výsledků, díky opakovatelnosti měření a kontrolovatelnému prostředí. Za hlavní proměnné se jak u teoretických, tak i u experimentálních modelů považuje tlak huštění a svislé zatížení pneumatiky. Laboratoř je tedy vhodné prostředí, protože lze jednoduše kontrolovat a upravovat hlavní proměnné.

Jedním ze způsobů experimentálního určení ploch kontaktu je metoda, kdy se vzorek měřené pneumatiky natře barvou a poté se pomocí hydraulického stojanu vytváří otisk vzorku na papír (Obr. 7). Na hydraulickém stojanu lze nastavit přesné hodnoty svislého zatížení. Pro dosažení přesnějších výsledků se otisknutí několikrát opakuje s mírným otočením pneumatiky bez posunutí a se stejným tlakem tak, aby byly vyplněny mezery mezi členy vzorku. Tím vznikne ucelený otisk vzorku na papíře, u kterého se následně změří délka, šířka a obkreslí se linie kolem otisku. Plochu otisku lze změřit planimetrem nebo pomocí digitální fotografie a speciálního softwaru.



Obr. 7 Otisky nabarveného vzorku pneumatiky Michelin MachXBib 710/70 R42, rozdíl velikosti ploch pro tlak huštění 140 kPa (a); 100 kPa (b); nárůst plochy o 24.5 % (VYKYDAL, 2015)

Další metodu založenou na obdobném principu použili i Taghavifar a Mardani (2013). V laboratorních podmínkách vytvářeli za pomoci hydraulického stojanu otisky pneumatiky (s rozměry 220/65 R21) do půdy o známých vlastnostech.



*Obr. 8 Testovací hydraulický stojan s měřicí technologií
(TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)*

Pro zjištění kontaktních tlaků umístili do půdy několik tenzometrů. Pro dostatečnou přesnost opakovali každé měření třikrát. Po každém měření byla půda opět urovnaná do původního stavu. Po třech provedených měřeních měnili tlak huštění a svislé zatížení pneumatiky. Cílem jejich testů bylo zjistit, jaký vzájemný vliv na sebe mají jednotlivé zkoumané parametry a zároveň otestovat metodu digitálního zpracování snímků.



Obr. 9 Tenzometry v půdě (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)

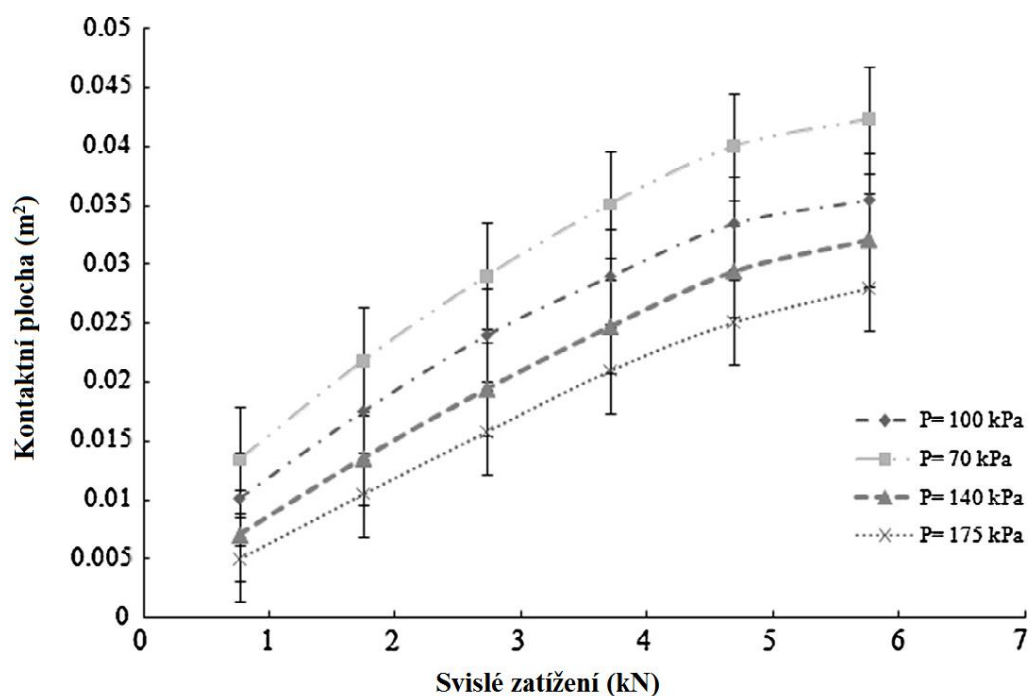
Pro vyhodnocení testů použili digitální fotoaparát pevně umístěný na testovacím stojanu. Půdu posypali bílým práškem pro lepší viditelnost obtisku. Po každém vtisknutí pneumatiky byl pořízen digitální snímek otisku. Snímek byl nahrán do softwaru, který zpracoval snímek na černobílé schéma otisku, z něhož bylo možné přesně změřit styčnou plochu.

Pneumatiku postupně zatěžovali a měnili i tlak huštění:

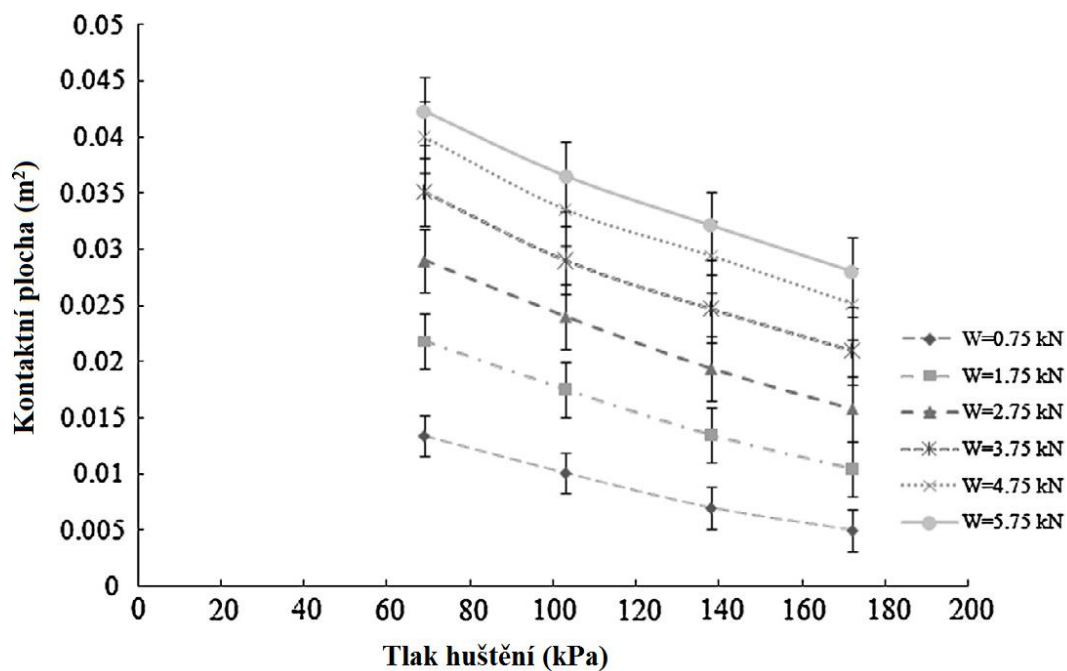
Nominální zatížení (kN)	Tlak huštění (kPa)
0.75	70
1.75	100
2.75	140
3.75	175
4.75	175
5.75	175

Tab. 6 Nominální zatížení a tlak huštění v testech (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)

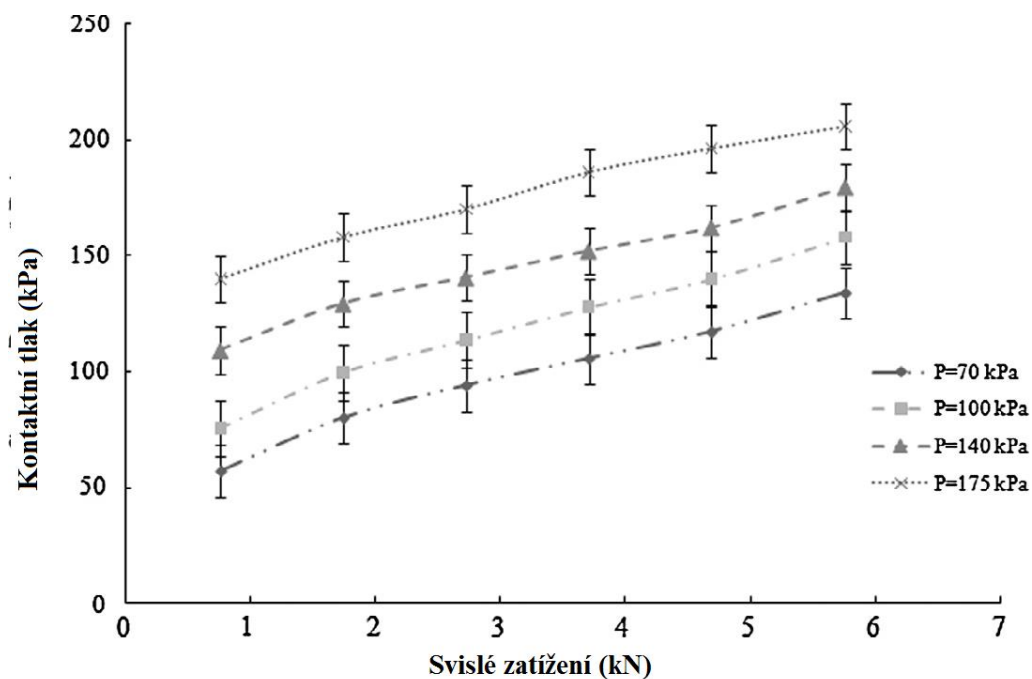
Výsledky měření uvedli Taghavifar a Mardani v následujících grafech.



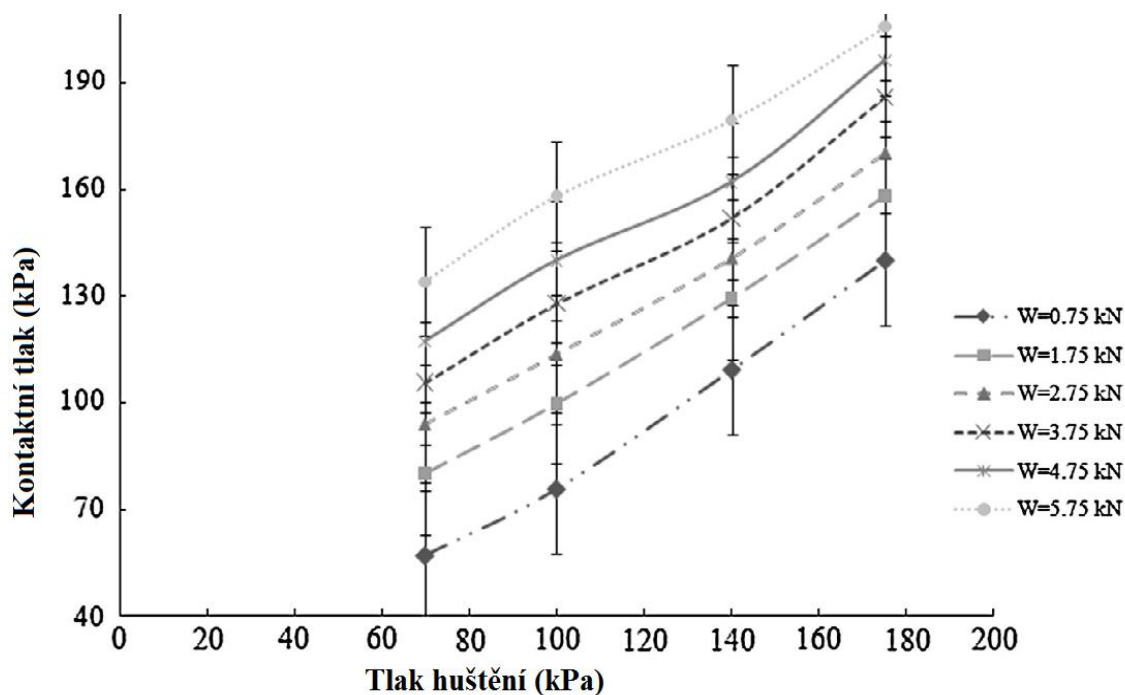
Graf 1 Vliv svislého zatížení na velikost kontaktní plochy (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)



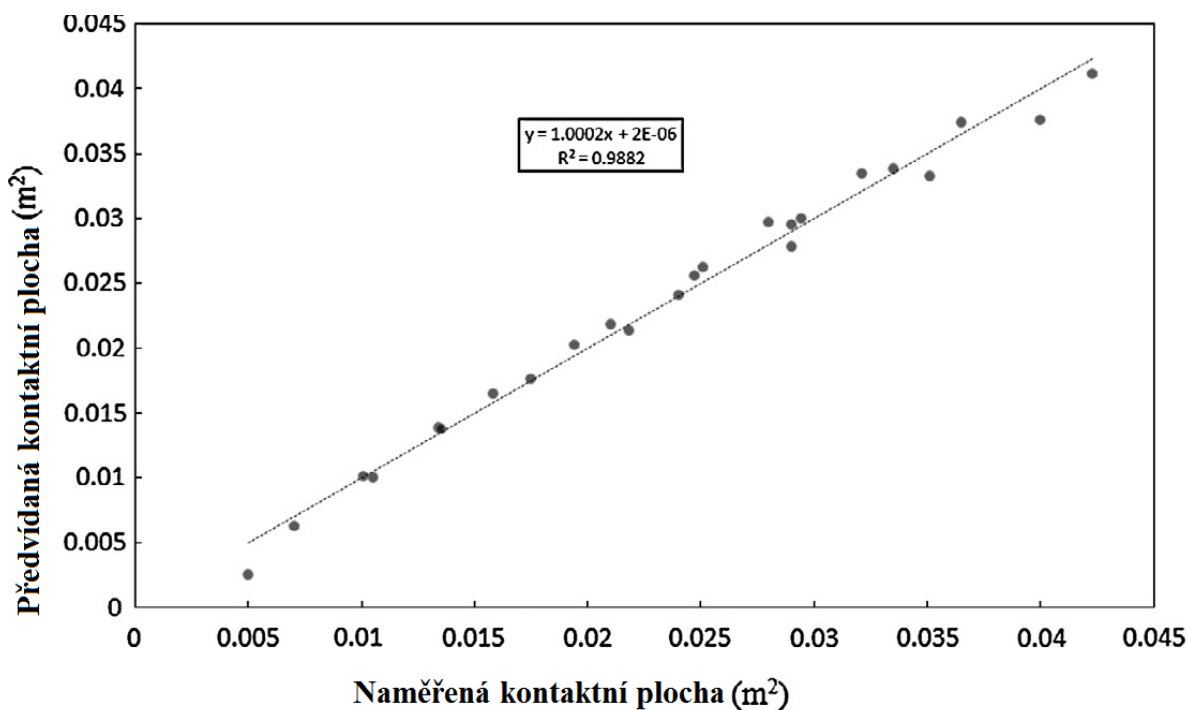
Graf 2 Vliv tlaku huštění na kontaktní plochu (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)



Graf 3 Vliv svislého zatížení na kontaktní tlak v půdě (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)



Graf 4 Vliv tlaku huštění na kontaktní tlak v půdě
(TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)



Graf 5 Naměřená versus předpovězená kontaktní plocha; $R^2 = 0.9882$ značí solidní přesnost této metody (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)

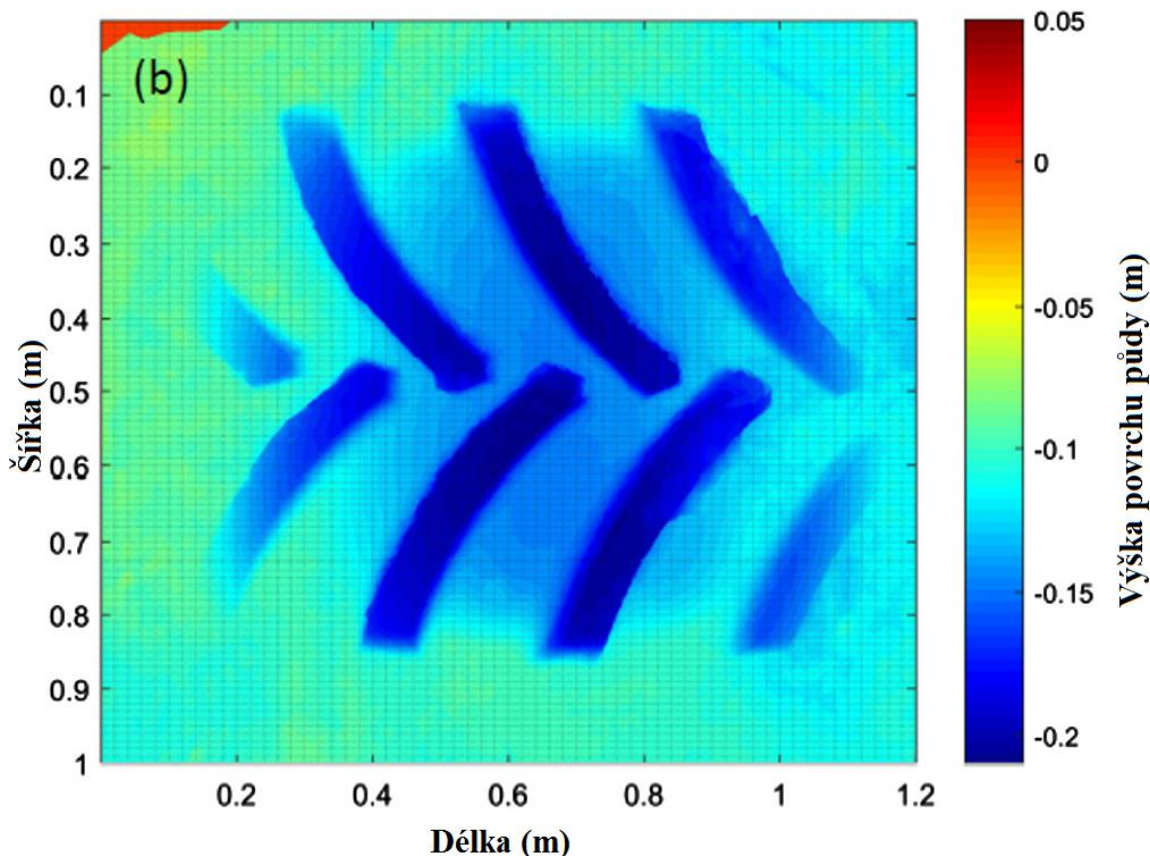
Z výsledků Taghavifara a Mardaniho (2013) je patrné, že metoda laboratorního měření a digitální zpracování snímků otisků vykazuje slibnou použitelnost při určování přesné

kontaktní plochy, jelikož bylo dosaženo lineárních výsledků závislosti různých parametrů. Dále bylo zjištěno, že zatížení a tlak huštění mají přímý vliv na kontaktní tlak v půdě a velikost kontaktní plochy.

Pro měření styčné plochy pneumatiky však lze využít i další moderní technologie jako je například digitální fotogrammetrie s blízkým dosahem. Tato technologie je využívána pro konstrukci 3D modelu otisku stopy pneumatiky v půdě. Základem této metody jsou digitální fotografie půdy. Snímky je nutné pořídit z několika úhlů s překryvem 60–80 % na bocích a vrších. Zatímco modelovací 3D software zvládne pracovat už se dvěma snímky, pořízení dostatečného počtu fotografií s překryvem však minimalizuje možnou modelační chybu. Model pak lze analyzovat a získat tak hloubku, plochu a objem otisku pneumatiky. Kenarsari a kol. (2017) provedl sérii pokusů a měření za pomoci 3D modelů a zhodnotil, že digitální fotogrammetrie poskytuje efektivní a přesnou metodu měření parametrů otisků pneumatik.



*Obr. 10 Zatížená pneumatika v testovacím boxu laboratoře
(KENARSARI, et. al., 2017)*



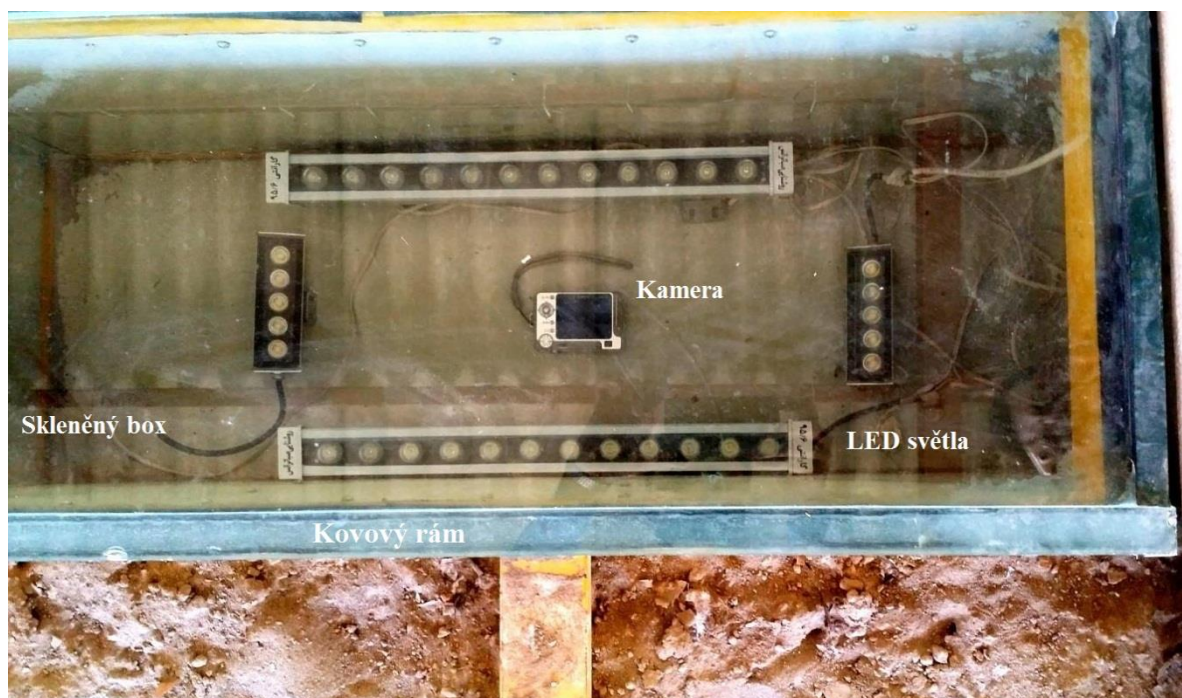
Obr. 11 Změna výšky povrchu půdy po zatížení pneumatikou, 3D model (KENARSARI, et. al., 2017)

4.2.2 Experimentální zjištění velikosti dynamických kontaktních ploch

Ačkoliv je častější užití metod pro měření statické kontaktní plochy, v praxi se téměř výhradně setkáme s dynamickým zatížením, tudíž je tato metoda velmi důležitá. Při pohybu pneumatiky po měkké půdě vznikají navíc valivé odpory způsobené deformováním půdy pneumatikou. Zjištění dynamické kontaktní plochy pneumatik je přínosné nejen pro určení kontaktního tlaku v půdě, ale zároveň lze výsledek použít v mnoha jiných odvětvích vývoje traktorů. Například při zlepšení odpružení a odolnosti proti vibracím. Experimentální zjištění dynamické kontaktní plochy je ovšem náročnější na technologii a postup.

Nový experiment zabývající se touto problematikou zveřejnil Derafshpour a kol. (2019). V jeho práci byl představen nový systém, který měří dynamickou kontaktní plochu v reálném čase. Principem tohoto pokusu je přejezd zatížené pneumatiky po skleněné desce, která je politá bílou tekutinou. Pod skleněnou deskou je v kovovém rámu upevněna digitální videokamera, která je speciálně naprogramována, aby rozpoznala takzvané „dotykové a

nedotykové oblasti“. Plocha oblasti dotyku je automaticky měřena ihned po průjezdu pneumatiky. Pro zajištění dostatečné viditelnosti byla v boxu spolu s kamerou LED světla.



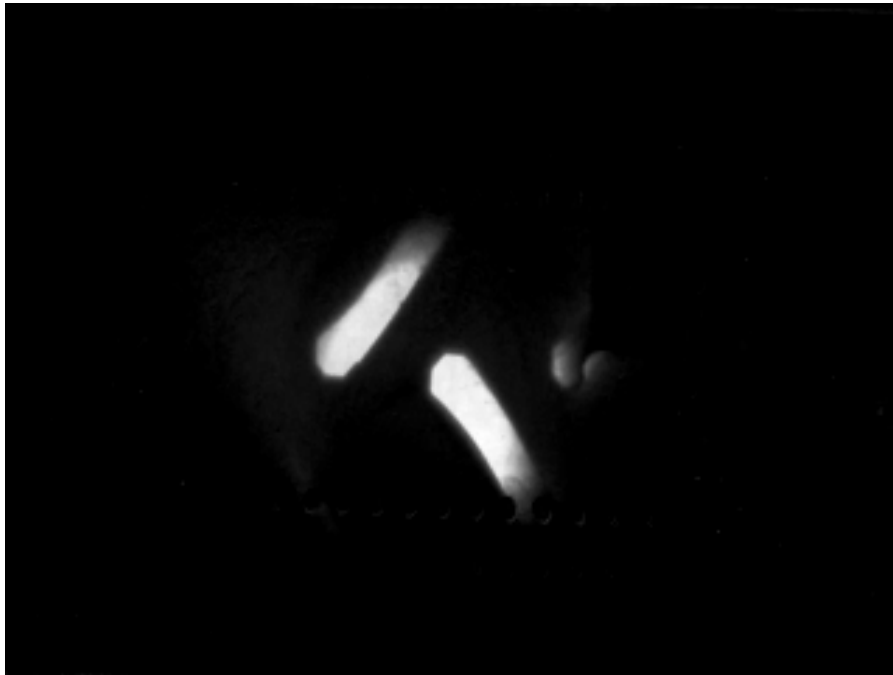
Obr. 12 Testovací box s kamerou, LED světly a skleněnou deskou

(DERAFSHPOUR, et. al., 2019)



Obr. 13 Skleněná deska před (a) a po (b) polítkou barvou (DERAFSHPOUR, et. al., 2019)

Po polítkou barvou se zatížená pneumatika převalí přes desku a její průjezd je dokumentován kamerou. Ke zpracování je použit software na rozpoznání světlých a tmavých míst na desce metodou nastavení prahových hodnot světlosti těchto pixelů.



Obr. 14 Zobrazená plocha po zpracování programem (DERAFSHPOUR, et. al., 2019)

Pro konečné změření dotykové plochy byl obraz otisku naskenován a byl spočítán počet pixelů. Šířka skla je rozdělena na 480 pixelů, což odpovídá 50 cm. Šířka každého pixelu je tedy rovna podílu 480/50. Na základě rovnice (22) byla spočítána plocha pixelů.

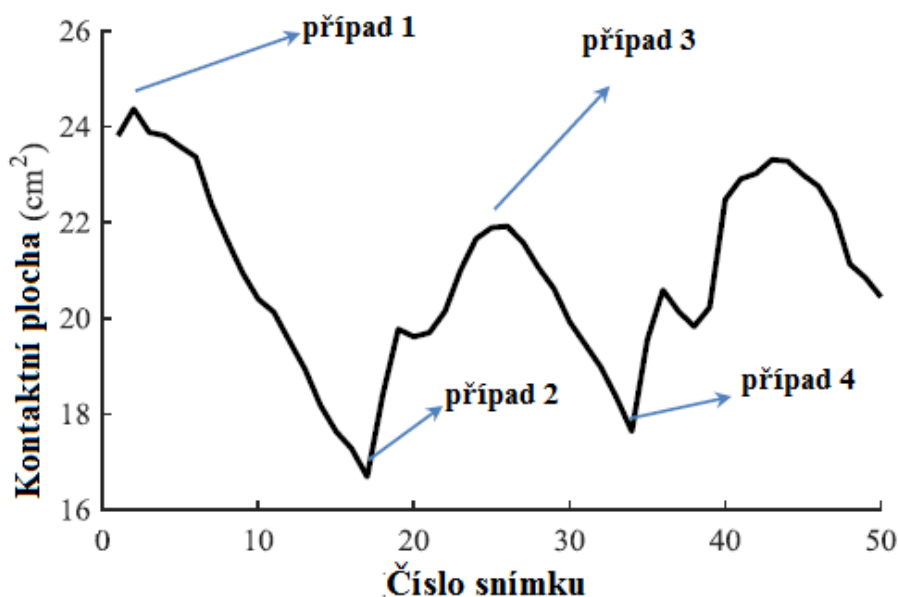
$$A_P = \left(\frac{50}{480}\right)^2 \text{ cm}^2 \quad (34)$$

Dále pak plocha jednotlivých typů pixelů.

$$A_T = A_P \cdot N_T \quad (35)$$

Kde A_P je plocha jednotlivých pixelů, A_T je plocha dotýkajících se pixelů a N_T je celková plocha dotyku.

Výsledkem práce Derafshpoura a kol. (2019) bylo zjištění, že vlastnosti kontaktní plochy valící se pneumatiky se periodicky opakují. Jak je patrné z grafu (6), plocha na snímcích 18 až 35 má stejné vlastnosti jako plocha na snímcích 35 až 50.



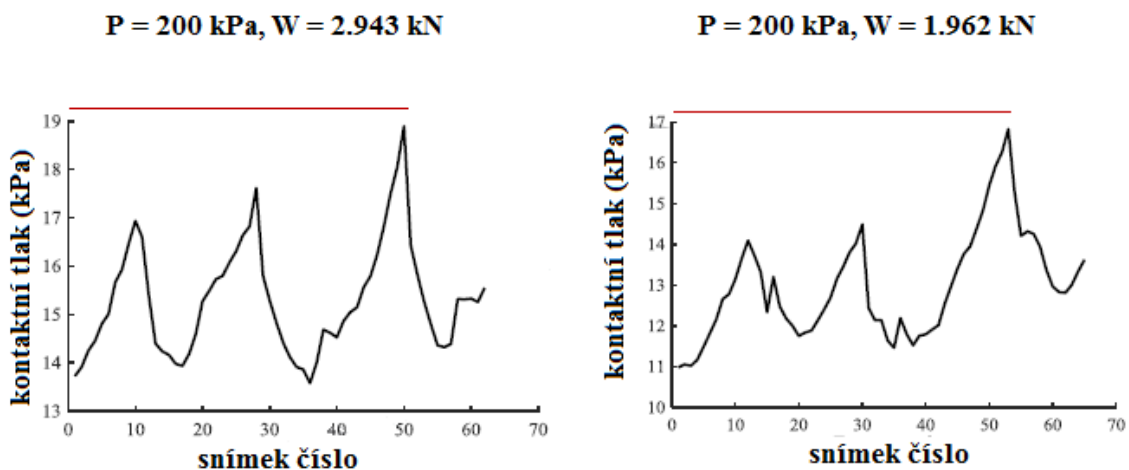
Graf 6 Změny kontaktní plochy při průjezdu pneumatiky (DERAFSHPOUR, et. al., 2019)

Dílčím výsledkem práce Derafshpoura a kol. (2019) bylo zjištění, že kontaktní tlak na půdu vypočtený podle rovnice (36) není přímo ovlivněn zatížením pneumatiky.

$$P = \frac{W}{A} \quad (36)$$

kde P je kontaktní tlak, W je svislé zatížení pneumatiky a A je její kontaktní plocha.

Na následujícím grafu lze vidět nepřímý vliv zatížení W na kontaktní tlak P. Zatímco zatížení bylo vyšší o 50 %, maximální hodnota kontaktního tlaku se zvýšila ze 170 na 190 kPa. Tento jen je přisuzován vyšší deformaci pneumatiky při větším zatížení a stejném tlaku huštění. Maximální hodnota kontaktního tlaku nevykázala velký nárůst, rozložení tlaku se však změnilo a z grafů jsou patrné větší výkyvy hodnot.



Graf 7 Rozdíl kontaktního tlaku při změně zatížení (DERAFSHPOUR, et. al., 2019)

5 Závěr

Stanovení velikosti kontaktní plochy je složitý proces ať už teoretický, či experimentální. Výsledky uvedených prací dokazují, že teoretické postupy výpočtů poskytují dobrou přesnost a jsou nenáročné na technologie. Náročnost samotných výpočtů vede mnohdy ke zjednodušování rovnic a možnému vzniku chyb. Klíčové je také správně zvolit postup a metodu výpočtu, na základě vlastností pneumatik a podložky.

Experimentální metody stanovení velikosti kontaktních ploch prováděné v laboratořích poskytují vysokou přesnost výsledků, nicméně jsou náročné na vybavení pro testování. S rozvojem nových technologií lze účinněji měřit a zaznamenávat potřebné údaje. Další výhodou experimentálních metod je podobnost reálnému prostředí a univerzálnost použití pro různé pneumatiky. Zároveň lze snadno pozorovat vliv změny vstupních proměnných jako je například svislé zatížení na výsledky. Použití digitálního záznamu a softwarového zpracování se jeví jako jedna z nejvhodnějších vyhodnocení experimentálních metod pro zjištění vlastností pneumatiky ať už při statickém, nebo dynamickém zatížení a to díky rychlosti, a hlavně přesnosti měření.

Pro srovnání získaných výsledků z výpočtů a měření lze použít hodnoty poskytnuté výrobcem pneumatik. Hodnoty velikosti kontaktních ploch jsou však uvedené pouze pro dané svislé zatížení a tlak huštění při statickém zatížení na tvrdé podložce. Právě tlak huštění a svislé zatížení mají největší vliv na velikost kontaktní plochy. Snížením tlaku huštění lze u moderních nízkotlakých pneumatik zvětšit velikost kontaktní plochy o desítky % a tím snížit i negativní dopady na půdu.

6 Seznam použitých zdrojů

BAUER, F. a kol. *Traktory a jejich využití*. Praha: Profi Press, 2013. ISBN 978-80-86726-52-6

DEJONG-HUGHES, J., MONCRIEF, J., VOORHEES, W.B., SWAN, J.B. *Soil Compaction: Causes, Effects and Control*. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service, 2001

DERAFSHPOUR, S., VALIZADEH, M., MARDANI, A., TAMADDONI, M., A novel system developer based on image processing techniques for dynamical measurement of tire-surface contact area, *Measurement* (2019)

'Farmers could save hundreds in fuel costs by choosing the right tyres' - Agriland.ie. Latest Farming News - Farming In Ireland - Farm Ireland - Agriland [online]. Copyright © Copyright 2019 Agriland Media Ltd. [cit. 30.03.2019]. Dostupné z: <https://www.agriland.ie/farming-news/farmers-could-save-hundreds-in-fuel-costs-by-choosing-the-right-tyres/>

Good Year Tyre Technical Manual. Share and Discover Knowledge - DOCSLIDE.NET [online]. Dostupné z: <https://docslide.net/documents/good-year-tyre-technical-manual.html>

GREČENKO, A., Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values. *J. Terramech.* 1995, 32, No. 6, pp. 325-333

GREČENKO, A., *Vlastnosti terénních vozidel*. Praha: Vysoká škola zemědělská v Praze, Technická fakulta, 1994. ISBN 80-213-1190-2

HARNISCH, C., LACH, B., JAKOBS, R., TROULIS, M., NEHLS, O., A new tyre-soil interaction model for vehicle simulation on deformable ground, *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 43:sup1, 384-394, 2005

JAVŮREK, M., VACH, M., Negativní vlivy zhutnění půd a soustava opatření k jejich odstranění. Výzkumný ústav rostlinné výroby. 2008. ISBN 978-80-87011-57-7

JURTÍK, T.: *Radiální pneumatiky Mitas a Barum*, Mechanizace zemědělství. Praha: 2006, č. 5 str. 21, Profi Press, ISSN 0373-6776

KENARSARI, E. A., VITTON, J. S., BEARD, E. J., Creating 3D models of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. *J. Terramechanics* 74, 1-11, 2017

LAMANDE, M. and SCHJONNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil and Tillage Research*, 114(2): 71–77, 2011

Michelinman [online]. Copyright © 2019 MICHELIN. Dostupné z: <https://agricultural.michelinman.com/us/Our-Tires/Tractor/US-XEOBIB>

SEMETKO, J., *Mobilné energetické prostriedky 2*. Bratislava: Príroda, 1985. Číslo publikace 5716

SHARMA, A. H., PADNEY, K. P., A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. *J. Terramech.*, 1996, 33, No. 5, pp. 253-264

SCHWANGHART, H., Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. *J. Terramech.*, 1991, 28, No. 4, pp. 309-318

STOREX - velkoobchod pneu [online]. Dostupné z: <http://storex.comin.cz/index.php?action=article&id=567>

TAGHAVIFAR, H., MARDANI, A., Contact area determination of agricultural tractor wheel with soil, *Cercetări Agronomice în Moldova*, Vol. XLV , No. 2 (150), 2012
The Evolution of Ag Tire Technology - Tire Review. *Tire Review: Information, Products,*

Business Operations [online]. Copyright © 2019 Babcox Media, Inc. All Rights Reserved [cit. 30.03.2019]. Dostupné z: <https://www.tirereview.com/the-evolution-of-ag/>

VYKYDAL, P., Vliv podvozku na tahové vlastnosti traktorů, Disertační práce, Mendelova univerzita v Brně, 2015

7 Přílohy

7.1 Seznam použitých obrázků

- Obr. 1 Uspořádání kostry pneumatiky (a) diagonální, (b) radiální
(Good year tyre-technical manual)
- Obr. 2 Znázornění tvarů styčné plochy diagonální (a) a radiální (b) pneumatiky
(storex.comin.cz)
- Obr. 3 Traktor Massey Ferguson 6616 s pneumatikami Michelin Ultraflex Technology
(www.agriland.ie)
- Obr. 4 Rozdíl ve zhutnění půdy mezi pneumatikami Michelin 65 series (a) a Michelin XEOBIB (b) při stejném zatížení – 3629 kg (<https://agricultural.michelinman.com>)
- Obr. 5 Test vtlačení desky do půdy (HARNISCH et. al., 2005)
- Obr. 6 Geometrie pneumatiky v měkké půdě (SCHWANGHART, 1991)
- Obr. 7 Otisky nabarveného vzorku pneumatiky Michelin MachXBib 710/70 R42,
rozdíl velikosti ploch pro tlak huštění 140 kPa (a); 100 kPa (b); nárůst plochy o 24.5 % (VYKYDAL, 2015)
- Obr. 8 Testovací hydraulický stojan s měřicí technologií
(TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)
- Obr. 9 Tenzometry v půdě (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)
- Obr. 10 Zatížená pneumatika v testovacím boxu laboratoře (KENARSARI, et. al., 2017)
- Obr. 11 Změna výšky povrchu půdy po zatížení pneumatikou, 3D model
(KENARSARI, et. al., 2017)
- Obr. 12 Testovací box s kamerou, LED světly a skleněnou deskou
(DERAFSHPOUR, et. al., 2019)
- Obr. 13 Skleněná deska před (a) a po (b) políání barvou (DERAFSHPOUR, et. al., 2019)
- Obr. 14 Zobrazená plocha po zpracování programem (DERAFSHPOUR, et. al., 2019)

7.2 Seznam použitých grafů

- Graf 1 Vliv svislého zatížení na velikost kontaktní plochy
(TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)
- Graf 2 Vliv tlaku huštění na kontaktní plochu (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)
- Graf 3 Vliv svislého zatížení na kontaktní tlak v půdě (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)

Graf 4 Vliv tlaku huštění na kontaktní tlak v půdě (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)

Graf 5 Naměřená versus předpovězená kontaktní plocha; $R^2 = 0.9882$ značí solidní přesnost této metody (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)

Graf 6 Změny kontaktní plochy při průjezdu pneumatiky (DERAFSHPOUR, et. al., 2019)

Graf 7 Rozdíl kontaktního tlaku při změně zatížení (DERAFSHPOUR, et. al., 2019)

7.3 Seznam použitých tabulek

Tab. 1 Doporučené hodnoty tlaku huštění (<https://agricultural.michelinman.com>)

Tab. 2 Katalogová data od výrobců (GREČENKO, 1995)

Tab. 3 Vypočtená velikost styčných ploch na základě různých rovnic, srovnání s hodnotami výrobce (GREČENKO, 1995)

Tab. 4 Rozměry testovaných pneumatik (SCHWANGART, 1991)

Tab. 5 Změřené body kontaktních ploch s ohledem na svislé zatížení, přerušované křivky jsou vypočítané hodnoty (SCHWENGHART, 1991)

Tab. 6 Nominální zatížení a tlak huštění v testech (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013)