



POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Barbora Řehák Kopečková

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Stroje a zařízení

Studijní obor:

Study branch

Konstrukční a procesní inženýrství

Pracoviště

Energetický ústav FSI VUT v Brně

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Multikriteriální nástroj pro analýzu a predikci tepelného stavu člověka

Školitel:

Supervisor

prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.

Oponent:

Opponent

doc. Ing. Radek Soukup, Ph.D.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor, aktuálnost tématu disertační práce

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Disertační práce je založena na výsledcích vlastní vědecké činnosti doktorandky Ing. Barbory Řehák Kopečkové, či činnosti v kooperaci s kolegy/partnery, na základě níž vznikly 2 články v časopisech s impakt faktorem a 9 příspěvků ve sbornících mezinárodních či národních konferencí. Množství výzkumných výsledků různé povahy tedy dokládá intenzivní vědeckou činnost autorky v rámci studia.

Předložená disertační práce, která se zabývá vývojem multikriteriálního nástroje pro predikci tepelného stavu člověka v ochranném obleku a v důsledku toho indukované tepelné zátěže, je vysoce aktuální a relevantní v několika směrech:

- Ochrana zdraví a bezpečnosti:** V kontextu osobních ochranných prostředků (OOP) pro ochranu lidského těla v nebezpečném prostředí (např. hasičské zásahy, chemické havárie, pandemie, vojenské operace) je klíčové zajistit efektivní ochranu proti tepelnému stresu. Tento nástroj umožňuje přesnější predikci tepelného stavu, což může vést k lepším rozhodnutím při výběru a používání ochranných oděvů. Navíc problematika tepelného stresu je velice aktuální i pro vrcholové sportovce z hlediska podávání optimálního fyzického výkonu, který klesá při přehřívání organismu (pokles výkonu až o 5 % při zvýšené teplotě jádra o 1 °C).
- Vědecký přínos:** Práce zahrnuje rozsáhlý výzkum a implementaci čtyř různých modelů tepelného stresu (PHS, IPHS, Gaggüv 2 uzlový model a FMTK model) a jejich validaci na

základě experimentálních dat. Tím poskytuje hluboký vhled do účinnosti a přesnosti těchto modelů, což přispívá k vědeckému poznání v oblasti fyziologie a termoregulace.

3. **Multidisciplinární přístup:** Vývoj multikriteriálního nástroje, který integruje výsledky z různých modelů a využívá objektivní rozhodovací schéma, představuje inovativní přístup kombinující fyziologii, matematiku, informatiku a inženýrství. Tento interdisciplinární přístup je velmi aktuální a potřebný pro predikci tepelného stavu člověka v ochranném obleku. Tato problematika zatím není dostatečně vyřešena.
4. **Praktická aplikace a spolupráce:** Práce byla provedena ve spolupráci se SÚJCHBO a využívá reálná data z experimentů provedených na probandech v různých ochranných oblecích a při různých teplotních podmínkách. To zajišťuje, že vyvinutý nástroj má praktickou relevanci a může být okamžitě aplikován v reálných situacích, což zvyšuje jeho užitečnost pro odbornou praxi.
5. **Rozšiřitelnost a budoucí využití:** Na základě výsledků validací bylo možné rozšířit podmínky aplikovatelnosti některých modelů, což naznačuje, že tento výzkum má potenciál pro další rozvoj a zlepšení modelů tepelného stresu. To otevírá dveře pro budoucí výzkum a aplikace v různých oblastech, jako je sport, medicína či extrémní pracovní prostředí.

Celkově tato disertační práce představuje významný krok vpřed v oblasti predikce tepelného stavu osob pracujících v ochranném obleku a to jak z hlediska teoretického výzkumu, tak z hlediska praktických aplikací.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Autorka postupovala v rámci disertační práce systematicky a metodicky správně. Na začátku práce formulovala řešený problém, popsala fyziologii lidského těla a vlastnosti ochranného oděvu a následně se podrobně věnovala problematice tepelného stresu a zátěže. Poté provedla kritické zhodnocení a analýzu modelů a indexů pro predikci fyziologického stresu.

V experimentální části práce autorka provedla experimentální studii odhadu metabolické aktivity, následně validační simulace vybraných modelů pro predikci tepelného stresu pomocí reálných testů na probandech a nakonec vytvořila multikriteriální nástroj.

Hlavní cíl disertační práce, tj. vytvoření multikriteriálního nástroje pro analýzu a predikci tepelného stavu člověka, byl úspěšně splněn. Tento cíl byl naplněn prostřednictvím návrhu a vytvoření multikriteriálního nástroje MKNS, který dokáže na základě objektivního rozhodovacího schématu vybrat nejvhodnější model pro predikci tepelné zátěže (hodnota rektální teploty) pro konkrétní podmínky. Na základě důkladně provedené rešerše byly pro tvorbu nástroje vybrány 4 nejvíce relevantní tepelné indexy/ fyziologické modely: Model/index PHS, Model/index IPHS, Gaggův 2 uzlový model a FMTK model. Tento nástroj, vytvořený v programu Excel s grafickým rozhraním, umožňuje široké využití a je založen na 1897 individuálních simulacích. Algoritmus výběru vhodného modelu pracuje s tabulkou 40 scénářů, kombinující různé podmínky a vstupy. Výsledný nástroj je transparentní s možností dalšího rozvoje a zpřesňování implementací dalších modelů.

Nástroj MKNS má významné praktické využití při předvídání rizik spojených s používáním ochranných oděvů, například pro hasiče a zdravotníky, kde nesprávná volba predikčního modelu by mohla vést k podhodnocení tepelné zátěže a následně k ohrožení zdraví.

Dále byly vytvořeny další dílčí výstupy práce, například regresní rovnice pro predikci metabolické aktivity člověka na základě srdeční frekvence s uspokoivými výsledky validace pro muže a ženy, a to jak pro střední zátěž, tak i pro klidové aktivity. Byly implementovány a validovány modely, včetně nového individualizovaného modelu IPHS, kde se ukázala jejich vhodnost pro predikci tepelného stresu, přičemž jednodušší modely jako IPHS prokázaly dostatečnou přesnost ve srovnání s komplexnějšími modely. Vyvinutý nástroj PTS, založený na simulacích modelu FMTK a implementaci jejich výsledků do vyhledávací tabulky v Excelu, prokázal dostatečnou přesnost pro predikci průměrné povolené doby pobytu v ochranném obleku, i když na individuální úrovni byly identifikovány výrazné nepřesnosti, které vedly k návrhu možných modifikací pro zpřesnění predikcí.

Disertační práce bezpochyby splnila vytyčené cíle.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Výsledky disertační práce dosahují dobrých výstupů s celou řadou praktických experimentů, například pro účely validace modelů a možnosti tvorby multikriteriálního nástroje byly ve spolupráci se SÚJCHBO realizovány poměrně časově náročně experimentální studie pro 4 typy ochranných kompletů (Tychem, OPCH, FOP, Tiger) a 4 hodnoty okolní teploty (-10 °C, 5 °C, 25 °C a 35 °C). Testování se celkově účastnilo 12 probandů (6 mužů a 6 žen) a celkem bylo provedeno 131 testů.

Validita výstupů práce byla rovněž ověřena pomocí dvou impaktovaných publikací, publikace v recenzovaném časopise a sedmi příspěvky na mezinárodních a národních konferencích. Na základě provedeného výzkumu a vývoje, který zachycuje předložená disertační práce, bylo vytvořeno know-how, které může být účinně využito v rámci dalšího výzkumu v oblasti analýzy a predikce tepelného stavu člověka na pracovišti Energetického ústavu FSI VUT v Brně. Z hlediska přínosu výzkumné činnosti disertační práce je jednoznačné, že byly validovány vybrané modely pro predikci tepelného stresu pro člověka pracujícího v ochranných oděvech a popsány jejich silné a slabé stránky a byl vytvořen multikriteriální nástroj MKNS, který je hlavním přínosem práce. Tento nástroj bude možné v rámci dalšího výzkumu rozvíjet. Přínos autorky k dosaženým výsledkům je jednoznačný.

Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Vlastní práce je poměrně obsáhlá, obsahuje 190 stran textu a 231 stran včetně příloh, což je téměř dvojnásobný rozsah oproti průměrnému rozsahu disertačních prací. Díky tomu je však problematika popsána do hloubky. Práce, která je vytvořena v českém jazyce, má dobrou úroveň technického jazyka, je psána čtivě a srozumitelně a text je dobře a logicky strukturován. Problematika experimentálních výsledků je vhodně provázána s teorií. Práce má velmi dobrou grafickou úpravu a je napsána velice pečlivě, o čemž svědčí i skutečnost, že i přes velký rozsah práce se v textu téměř nevyskytují překlepy nebo gramatické chyby.

Mírná výtka však směřuje k faktu, že za každou číselnou hodnotou, pokud nejsou číselné hodnoty mezi sebou spojeny spojovníkem, by měly být uvedeny jednotky. Tento nedostatek vůči zásadám psaní odborného textu se vyskytuje v práci opakovaně, například "...výkonu 100 a 150 W... na straně 19, ...od 200 do 500 ml·min⁻¹... na straně 25, ...v rozmezí od 27 do 29 °C... na str. 35, ... 0,1 až 22 m·s⁻¹ rychlost... na str. 54 atd. Dále by se podle pravidel pro psaní technických textů (norma: ČSN EN ISO 80000) v tabulkách a grafech neměly psát jednotky do hranatých závorek, což se v práci opakovaně objevuje téměř ve všech tabulkách a grafech, viz popisky grafů na Obr. 12, 13, 14, 17 atd. i popisky tabulek Tab. 2, 3, 4, 8, 11 atd.

I přes zmíněné výtky shledávám celkově práci z formální stránky za velice nadprůměrnou.

Vyjádření k publikacím studentky

Statement to student's publications

Z publikační a výzkumné aktivity, která je dostupná v databázi WoS (celkem 8 publikací, h-index: 2) a Scopus (9 publikací, h-index: 3), že autorka práce má zkušenosti s prezentací svých výsledků na mezinárodních konferencích, ale i s tvůrčí činností ve formě funkčních vzorků a softwaru. Z dostupných zdrojů je patrná účast při řešení výzkumných problémů v rámci grantů (vnitřní granty VUT, projekt programu NCK TAČR a projekt v rámci programu Zéta TAČR, který je zaměřený na podporu začínajících výzkumníků a výzkumníků v inovačních aktivitách, kde byla autorka hlavním řešitelem).

Lze tedy konstatovat, že autorka disertační práce splnila i požadavky kladené na publikační činnost.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Na základě předložené práce a z pohledu publikace jejich výsledků v odborné literatuře lze konstatovat, že autorka plně prokázala schopnost vědecky samostatně pracovat a také schopnost získané výsledky začlenit do kontextu současného stupně vědeckého poznání. Autorka rovněž přispěla k rozvoji problematiky v rámci jejího pracoviště. Disertační práce odpovídá obecně kladeným požadavkům uvedených v §47 odst. 4 zákona o vysokých školách nezbytným pro udělení akademického titulu Ph.D. **Předloženou práci Ing. Barbory Řehák Kopečkové doporučuji k obhajobě.**

Připomínky a dotazy k obhajobě:

- 1) V disertační práci jste uváděla, že probandi v rámci prováděných testů v laboratoři SÚJCHBO v Příbrami absolvovali před testy 15minutovou stabilizaci v odpočinkové místnosti, kde měli v případě potřeby volný přístup k pití. Během této doby však nemusí organismus dosáhnout dostatečné hydratace, což může ovlivnit jeho odolnost vůči tepelnému stresu. Sledovali jste pitný režim probandů nějakým způsobem několik hodin před testem, kromě toho, že byl vyloučen alkohol? Dávalo by smysl provádět další měření pro zvýšení objektivizace testů, například měřením hydratace pokožky, elasticity kůže, tzv. test kožního turgoru nebo posouzení zbarvení moči?

- 2) V rámci práce využíváte pro vyhodnocení výsledků simulací vůči experimentům hodnoty MAE (Mean Absolute Error). V práci rovněž uvádíte, že pokud dojde k rozdílům mezi výsledky dané predikcí a výsledky vycházejícími z měření až ke konci scénáře, hodnota MAE není schopna tuto skutečnost adekvátně zohlednit, zvláště pokud po většinu doby daného testu docházelo k dostatečné přesnosti odhadu rektální teploty. Proto jste ještě mimo hodnotu MAE, která obecně porovnává celkový průběh dvou funkcí (jejich blízkost), sledovala také rozdíl mezi predikovanou a měřenou hodnotu rektální teploty na konci měření. Mohla byste navrhnout nějakou jinou statistickou metriku místo MAE, která by lépe dokázala porovnat rozdíl mezi predikovanými průběhy a naměřenými?
- 3) Na straně 165, že vstupy FMTK modelu jsou již redukovány pouze na 1 variantu, kdy se jedná o solární záření q_{sr} , jehož hodnota je stanovena na $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, tedy téměř žádné přímé sluneční záření. Přímá sluneční expozice však patří mezi rizikové faktory související se zhoršenou reakcí na tepelnou zátěž. Rozumím tomu správně, že jste během experimentů s expozicí osob slunečním zářením neuvažovala? Pokud ne, zapracujete tento faktor v budoucnu do vašeho nástroje?
- 4) Na str. 88 uvádíte, že pro měření t_{re} u probandů byl využit systém Viridia (Philips Medical Systems, Boeblingen, Německo) s rektální sondou Philips 21075A s přesností $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ v rozmezí $25 \text{ }^\circ\text{C}$ až $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Na další straně píšete, že jste pozorovala rozdíly v počáteční rektální teplotě $t_{re,0} = 36,9 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Dále uvádíte měření rektální teploty u probandů s přesností na 1 desetinu $^\circ\text{C}$. Můžete prosím vysvětlit, jak je to s přesností měření pomocí sondy Philips 21075A?
- 5) Na straně 35 uvádíte systém CORE od švýcarského start-upu GreenTag. My s tím systémem začínáme pracovat v rámci chytrých hasičských obleků. Počítáte do budoucna, že byste tento systém využívala pro sběr většího množství experimentálních dat? Můžete prosím zhodnotit výhody a nevýhody tohoto systému?
- 6) Na straně 37 uvádíte rovnici (6.2) $\Delta m_g = \Delta m_{sw} + \Delta m_{res} + \Delta m_o + \Delta m_{wat} + \Delta m_{sol} + \Delta m_{clo}$. Je v této rovnici uvažována transepidermální ztráta vody (TEWL)? Je na mysli TEWL, což je pasivní difúze kožní bariérou, která závisí na gradientu tlaku vodní páry na obou stranách vrstvy kůže. Množství vody, které prochází stratum corneum, je za normálních podmínek 300 ml - 400 ml za den. Jestliže relativní vlhkost okolního ovzduší je 100 %, TEWL bude snižena téměř na nulu, a obráceně, je-li relativní vlhkost rovna 0 %, TEWL bude maximální. Navíc TEWL je zajímavý pomocný ukazatel pro monitorování tepelného stresu, jelikož existuje korelace mezi tepelným stresem a transepidermální ztrátou vody.
- 7) Na str. 61 uvádíte, že nepřesnosti, detekované při srovnání predikovaných a naměřených teplot pokožky, byly způsobeny skutečností, že při experimentu byly senzory měřící teplotu kůže přelepeny páskou. Jak poté byly teplotní senzory připevněny na probandy? Uvažovala jste o přímé integraci teplotních senzorů přímo do funkčního prádla probandů?
- 8) Uvažujete využít strojové učení pro váš nástroj?

Doporučuji disertační práci k obhajobě
I recommend the dissertation for the defence

ano yes	x	ne no
------------	---	----------

Teze přiložené k disertační práci jsou dobře strukturované a představují zdařilý výtah klíčových bodů z disertační práce. Autorka pečlivě vybrala a shrnula nejdůležitější informace, což umožňuje čtenáři získat jasný a rychlý přehled o hlavních cílech, metodách a výsledcích jejího výzkumu.

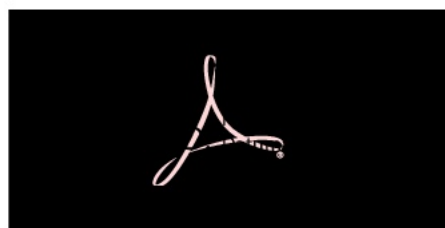
Text tezí je pečlivě zpracován a obsahuje všechny požadované body, které jsou jasně a logicky uspořádány. Jednotlivé sekce jsou dobře označené, což přispívá k přehlednosti a usnadňuje orientaci v dokumentu. Klíčové body jsou srozumitelně vysvětleny a podloženy relevantními údaji a argumenty.

Další pozitivní aspekt je absence gramatických chyb a překlepů v textu. Pečlivá korektura a důraz na jazykovou správnost dodávají dokumentu profesionální úroveň a svědčí o autorčině pečlivosti a pozornosti k detailům.

Celkově lze konstatovat, že teze k disertační práci jsou výborně zpracované a plně odpovídají požadavkům kladeným na tento typ dokumentu. Autorka prokázala schopnost jasně a přesně komunikovat podstatné aspekty své práce a poskytla čtenářům hodnotný přehled o obsahu disertační práce.

Datum: V Plzni 03.06.2024

Podpis oponenta:
Signature of opponent



doc. Ing. Radek Soukup, Ph.D.
Fakulta Elektrotechnická, ZČU v Plzni
Univerzitní 22
301 00 Plzeň
E-mail: rsoukup@fel.zcu.cz