

Využití numerických modelů a moderních technologií pro návrh a optimalizaci veřejného prostoru města

*Use of numerical models and modern technologies for the
design and optimization of public space in the city*

Petra Okřinová, Daniel Nikolov

Abstract:

Nowadays, microscopic models of the movement of pedestrians are commonly used aboard, both for assessing the safety of people and for ordinary pedestrian traffic behaviour. Examples include models of the evacuation of people in danger, operational models of movement at public events (festivals, parades, Christmas markets, etc.) or models of movement of persons when transported within transport hubs and connecting traffic. Quality input data are a crucial element of any modelling, including modelling of pedestrian traffic in public space. Before the actual design of the area is addressed, we need to know its input parameters, such as a number of people, directional survey, calculation of intensity on individual corridors, the capacity of dispersal areas, etc., which can serve as input data of the model for the analysis of the specifically addressed design. Even though we live in modern times, when data sharing has become a normal daily part of people's lives, it is very difficult to obtain data relating to people, the operation of the city and foot traffic in it. With the development of Smart Cities using modern technologies and data to increase the efficiency, economic development, sustainability and quality of life of citizens in urban areas, new possibilities are opening up for obtaining high-quality input data for numerical modelling that could lead to the symbiosis of these two sectors, resulting in an effective tool for urban governance and planning. The article is focused on the presentation of numerical modelling of pedestrians and its possible use in the design and optimization of public space. The process of analysing the quality of pedestrian traffic using a numeric model of pedestrian traffic is demonstrated in the concrete proposal of the revitalization of Mendl's Square (urban transport hub in Brno). Simulation results, such as trajectories of people, Level of Service (LoS), the density of persons per m², an average speed of persons, time of delay, etc., are indicators by which we can analyse the design and reveal the so-called "critical spots", evaluate the future comfort of the movement of persons in the area considered, optimize the operational processes as well as the geometry of the design itself. The future use of these methods for urban planning could be seen as a significant contribution to the creation of technically sound and functional solutions, both in terms of capacity, traffic flow and comfortable moving.

Keywords:

Numerical modeling, movement of people, Smart Cities technology, comfort, design optimization, public space

OKŘINOVÁ, Petra, NIKOLOV, Daniel (2021). Využití numerických modelů a moderních technologií pro návrh a optimalizaci veřejného prostoru města.

In: KUGL, Jiří, ed. *Člověk, stavba a územní plánování 15*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. pp. 174–191. ISBN 978-80-01-07049-9. ISSN 2336-7687.

Článek je licencován pod licencí Creative Commons BY-NC-ND 4.0 (Uvedte autora-Neužívejte komerčně-Nezpracovávejte 4.0 Mezinárodní). Licenční podmínky: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.cs>

1 Úvod

V dnešní době již můžeme konstatovat, že klíčem ke spokojenému životu obyvatel je návrh měst za využití lidských měřítek, tak jak ve své práci „Města pro lidi“, uvádí J. Gehl [1]. Prostředí města a doprava v nich by měla obyvatelům nabízet širokou škálu možností přepravy a tras pro jejich volný pohyb v rámci plnohodnotného života v tomto městském prostředí. Dopravní prostor měst je v dnešní době s tímto cílem zatráktivován tak, aby vybízel zejména k chůzi či k cyklistické dopravě. Chůze je základem každodenního života, a to nejen ve smyslu pěší dopravy z bodu A do bodu B, ale jako elementární složka pro uspokojení běžných potřeb a činností každého člověka. Doprava ve městech při návrhu těží především ze zkracování vzdáleností, s nímž se snižuje potřeba vzdálené přepravy a tím i využívání MHD či automobilové dopravy. Pěší doprava je klíčovou součástí dobře fungujících měst v kontextu celé společnosti. Její důležitost (poptávka) a atraktivita se přímo odvíjí od její kvality, komfortu a časového zdržení.

Pro posuzování kvality pěší dopravy, ověřování návrhu, tak i pro bezpečnost osob jsou v dnešní době v zahraničí běžně využívány mikroskopické modely pohybu. Příkladem užití mohou být např. provozní modely pohybu při veřejných akcích [2], [3] či modely pohybu osob při přepravě v rámci dopravních uzlů a návazné dopravy [4]. Pro každou tvorbu numerického modelu (dále už jen NM) jsou důležitá kvalitní vstupní data, nevýjimaje modelování pěší dopravy za účelem analýzy konkrétně řešeného návrhu území. I přesto, že sdílení dat se stalo běžnou součástí každodenního moderního života lidí, je velmi složité tato data týkající se osob a jejich pěší přepravy ve vřemě prostoru získat. S nástupem a rozvojem tzv. inteligentních měst (Smart Cities) využívající moderní technologie a data ke zvýšení efektivity, ekonomického rozvoje, udržitelnosti a kvality života občanů v městských oblastech se otvírají nové možnosti i při získávání dat, která by bylo možné užít jako kvalitní vstupy pro NM, což by mohlo vést k symbióze těchto dvou odvětví, ústící v efektivní nástroj pro správu a plánování území měst.

V první části článku jsou nastíněny základní principy Smart City (dále jen SC) z pohledu jejího vývoje a druhů technologií a metod sběru dat. Dále se článek zaměřuje na NM pěších osob a jeho možného využití při návrhu a optimalizaci veřejného prostoru. V konečné části je představen aplikační příklad konkrétní analýzy návrhu Kanceláře architekta města Brna (dále již jen KAM) revitalizace městského dopravního uzlu Mendlovo náměstí v Brně, na kterém jsou demonstrovány možnosti užití NM pro účely zhodnocení dostupnosti veřejné dopravy, efektivity přestupních bodů, analýzy technického řešení veřejného prostoru, návaznosti provozu na MHD a posouzení konkrétních řešení na celkové využití veřejného prostoru. V tomto článku bude také blíže představen způsob optimalizace veřejných ploch za využití ideálních trajektorií agentů.

Výstupy práce budou moci sloužit, jako podklad pro optimalizaci návrhu a rozpoutání diskuse z řad odborníkům jakými jsou např. architekti, urbanisti, projektanti apod., kteří jsou při své práci často odkázáni pouze na normy, všeobecné zásady navrhování a vlastní zkušenosti. Pomocí výsledků simulací NM lze také zhodnotit budoucí komfort pohybu osob v posuzovaném prostoru, optimalizovat provozní procesy i geometrii samotného návrhu. Část vybraných výstupů a poznatků byla již publikována v rámci diplomové práce [5] jednoho z autorů.

2 Rešerše

Pěší doprava je neefektivnější způsob přepravy na krátké vzdálenosti a samotná vzdálenost je hlavním kritériem při výběru typu dopravního prostředku. V návaznosti na tuto analogii začali vznikat jako koncepty SC tzv. „super bloky“ [6]. Které při návrhu území, dělí prostor do bloků, kde je koncentrováno vše, co je potřeba ke kvalitnímu životu, jako je např.: místní řezník, pekař, spotřební služby a zboží, relaxační zóny apod. s cílem zkrátit docházkové či dojezdové vzdálenosti. Dalším příkladem snahy o zkrácení cest mohou být sdílené kanceláře, kdy zaměstnanec nemusí přes celé město, ale užívá sdílenou kancelář v docházkové vzdálenosti od svého bydliště. Díky těmto myšlenkám lze ve městech snížit poptávku po osobní dopravě a zvýšit atraktivitu pěší a veřejné dopravy.

Jelikož je v poslední době aktuálním trendem pěší dopravu při návrhu měst upřednostňovat, je odborníky kladen důraz především na její kvalitu. Příkladem mohou být velké města jako je např. Londýn vydávající metodiky a příručky, jako kvalitní podklad pro urbanisty a osoby nesoucí zodpovědnost za návrh ulic, právě s ohledem na komfort pěších [7]. S rozvojem technologického pokroku vyvstává každým dnem myšlenka rozšíření využití SC. Město lze považovat za SC, jak je uváděno v [8], jakmile jeho infrastrukturu spravují inteligentní a udržitelná pokročilá technologická řešení. Základním cílem budování SC je poskytovat udržitelný život pro své obyvatele vzhledem k životnímu prostředí. Jednou z prvotních příčin původního rozvoje konceptu SC byl globální rozvoj průmyslu, který přispěl k rychlé urbanizaci lidské společnosti. Ta sebou přinesla i velkou spotřebu přírodních zdrojů, a tudíž i velkou zátěž na životní prostředí [9]. Aktuální koncept SC by měl být aktivním předmětem řešení, a to zejména s ohledem na předpoklad ze zdroje [10], který uvádí, že 66 % světové populace bude do roku 2050 žít v městských oblastech.

V poslední době nejen při navrhování pěší dopravy vzniká poptávka po datech a informacích spojených s aktuálními provozními i zátěžovými kapacitami, četností osob v různých typech provozů, zařízeních, dopravních uzlech, kancelářských budovách a jiných veřejných místech za účelem optimalizace, zvyšování bezpečnosti a plynulosti provozů. S ohledem na zmiňované potřeby se přistoupilo ke sledování tras chodců, sčítání jejich počtů a environmentálních parametrů za účelem městského plánování. Pro tyto účely jsou zavedeny různé metody sčítání chodců pomocí moderních technologií. Vybrané z nich jsou blíže popsány v kap. 2.2 nebo ve výzkumech uváděných v [11], [12], [13].

2.1 Způsoby numerického modelování

V dnešní době, kdy výstavba na tzv. „zelené louce“ je velmi ojedinělá, a naopak prostor pro nové návrhy je značně omezen, jak samotnou výstavbou, tak novými požadavky pro které a je nutné navrhovat efektivní a optimalizovaná řešení měst s užitím nejnovějších poznatků a přístupů. Proto se i v dnešní době numerické modelování stává běžnou součástí při funkčním navrhování měst a veřejných prostranství. Příkladem mohou být z pohledu environmentu člověka např. modely klimatických vlivů, pro které pro je shromážděna spousta experimentálních dat, jak uvádí i [14] [15] [16] [17] [18].

Na zmenšených modelech jsou zjišťována základní data např. o: proudění vzduchu mezi budovami [15], vliv natočení budov na vnitřní klima měst [16], modely predikující povodně a jejich případnou eliminaci [17] či vlivu výsadby stromů k poměru výšky budov a šířky uličního profilu [18].



obr. 1 (vlevo) – Ukázka výstupů z numerických modelů (a) prodělení vzduchu mezi budovami [15], (uprostřed) – predikce záplavových území [17], (vpravo) – vliv natočení budov na vnitřní klima měst [16]

Například v práci [14] je uváděno, že při výsadbě stromů ve městech by se mělo přihlížet především k aspektům vizuálního a tepelného komfortu chodců. Bylo ověřeno, že nejlepší tepelné a vizuální výsledky dosahují hustě sázené stromy s velkou korunou v ulicích o poměru výšky budovy vůči šířce uličního profilu s poměrem 1 až 2. Zato hustě sázené malé stromy s menší korunou mohou být vhodné pro užší ulice s poměrem 2 až 3. Oproti náhodné či nevhodné výsadbě, cílené sázení stromů s konkrétním záměrem může tyto aspekty zlepšit [19].

Další aplikací moderního přístupu navrhování je i využití numerického modelování pohybu chodců, které je skvělým nástrojem při náročných rozhodovacích procesech během návrhu revitalizací území a velkých složitých provozů (očkovací centra, dopravních uzlů apod.) či při evakuacích specifických staveb (metro, hudební festivaly). Pomocí měřitelných ukazatelů, jakými jsou například trajektorie, rychlost, hustota a čas chodců lze již během návrhové části projektu identifikovat např. nevyužívané plochy, které mohou být po úpravě návrhu lépe využity či proměněny v městskou zeleň, která je hlavním pilířem při zlepšování životního a tepelného komfortu chodců. Díky výstupům a možnostem simulací NM lze tak získat ověřená řešení návrhu a předejít tak nefunkčním návrhům s možnými kritickými místy.

Mezi základní užívané přístupy při navrhování měst z pohledu pohybu chodců patří zejména následující dva typy modelů, makroskopické a mikroskopické. Numerické modely ztvárňují charakteristické rysy osob dle míry jejich detailu a mají schopnost reprodukovat pozorované davové jevy. Mezi ty nejpokročilejší se pak řadí modely založené na tzv. „agentních technologiích“.

2.1.1 Makroskopické modely

Makroskopické modely vnímají dav jako kontinuální médium charakterizované globálními, zprůměrovanými veličinami jako je např. hustota a střední rychlost. Stejně jako modely automobilového provozu jsou založeny na diferenciálních rovnic odvozených z dynamiky tekutin zohledňujících zákony zachování hmoty, energie a hybnosti. Makroskopické modely silničního provozu byly zavedeny již v padesátých letech 20. století Lighthill a Whitham [20] a Richards [21] a jsou do dnes aktivně využívány. Naopak využití těchto principů pro modelování pohybu chodců je vcelku novinkou, kterou zavádí ve své práci např. Hughesem [22]. Definuje dav jako „myslící tekutinu“ a představil model založený na zákonu zachování hmotnosti pomocí Eikonálovky rovnice, která popisuje směr pohybu na základě rozložení hustoty v dané oblasti. Výzkum v této oblasti od té doby zaznamenala rychlý vývoj a současná literatura uvádí ve spojitosti s makroskopickými modely užití principů, jako jsou: rovnice dynamiky plynů [23], metody

gradientního proudění [24], zákony zachování s neklasickými šoky [25], nelokálních toků [26] a času s vyvíjejícím se množstvím osob [27]. [28]

2.1.2 Mikroskopické modely (agentní technologie)

V roce 2004 Hoogendoorn navrhl mikroskopickou teorii modelování chodců tak, že za předpokladu vytvoření chodce jako adaptivního agenta, bude možné autonomně minimalizovat subjektivní cenu/ochotu chůze – ideální trajektorie, nejkratší/nejefektivnější cesty [29]. Správnou funkci modelování agentů tehdy zajišťovali komplexní řídicí rovnice a náročná validace parametrů modelu. V čase se tyto postupy vylepšovaly až do dnešních podob, kdy je pro validaci modelu využíváno i strojové učení. Základní teorie agentního mikroskopického modelování chodců zůstala stejná – jedna osoba v modelu je ztvárněna agentem, který se na základě vypočtené hodnoty rozhoduje pro nejlepší trasu/směr. Hlavní změnou je zejména přístup během determinace ceny/ochoty chůze jednotlivého agenta, procesu výpočtu a aktualizaci výsledku [30].

$$U_k = \omega_e \cdot E_k + \omega_o \cdot O_k + \omega_p \cdot P_k + \omega_a \cdot A_k + \omega_l \cdot I_k + \xi \quad (1)$$

Rozhodnutí zvolit směr k je učiněno přístupem maximalizace užítku, ve kterém je jako užitek pro každé k přiřazena hodnota představující ochotu agentů vydat se tímto směrem. Užitek lze vypočítat prostřednictvím uvedené rovnice viz (1). Zvážením několika faktorů, které mohou ovlivnit volbu chodců, se vybere směr s největším užitekem U_k . Je třeba vzít v úvahu i zvláštní situace, které způsobují symetricky rozložené hodnoty užítku ve směru k . Vezmeme-li v úvahu, že lidé ve většině regionů po celém světě mají pravostrannou preferenci, je v takovém případě vybrán pravý směr ze symetricky rozložených užítků. Toto jsou situace, kdy jsou užity váhové parametry $\omega_e - \omega_l$, k úpravě citlivosti každého faktoru a ξ stochastická proměnná používaná k úpravě chyb nulových a minusových hodnot. Další neznámé na pravé straně funkce představují touhu chodců přiblížit se k cíli, stejně jako přiblížení/interakci mezi chodci, prostředím a mezi různými entitami v modelu. Distribuce pohybu je poté prováděna spojením navigačního modulu, založeným na globálním pohledu modelu, který agentovi poskytne cílovou polohu a předběžný výběr trasy. Agent je následně povinen postupovat směrem k cíli a zároveň přizpůsobit rychlost pohybu dle prostředí, vyhnout se srážkám s ostatními chodci a překážkám v každém výpočetním kroku. Agent je v modelu reprezentován kružnicí, která má citlivostní sensor znázorňující zorné pole agenta [30].

2.2 Zdroje vstupních dat o počtu a intenzitách osob

Vstupní informace, jako jsou: počet osob, směrový průřez, výpočet intenzit na jednotlivých koridorech, kapacit rozptylových ploch apod., nám mohou sloužit jako vstupní data NM pro analýzu konkrétního řešeného návrhu. Mimo rozvoje počítání osob v budovách a uzavřených prostorech některá města v USA [31], Evropě [32] a Austrálii [33] již začaly aplikovat chytré technologie ve svých městech pro počítání chodců a sběru dat o environmentu. Údaje jsou shromažďovány v místech s ohledem na míru pěší aktivity. Tato data mohou být využita pro plánování a řešení mimořádných událostí (např. revitalizace a provozní změny v území), které mohou být nápomocné urbanistům pro učené rozhodování.

Město	Tech. snímání	Měřené vlastnosti	Tech. přenosu	Spotřeba energie	Cena	Reference
Melbourne	Termální a laserový sensor	Sčítání chodců	3G	Vysoká	Vysoká	[33]
Liverpool, Sydney	Video kamery	Sčítání chodců a automobilů	LoRa	Nízká	Vysoká	[34]
Auckland	Termální kamery	Sčítání chodců a směr chůze	3G	Vysoká	Vysoká	[35]
New York	Video kamery	Sčítání chodců	4G	Vysoká	Vysoká	[31]
Dublin	Video kamery	Sčítání chodců a směr chůze	3G	Vysoká	Vysoká	[36]
Barcelona	Termální kamery	Sčítání chodců	3G	Vysoká	Vysoká	[32]
Macquarie	PIR sensory	Sčítání chodců, teplota, vlhkost, tlak, CO2	LoRa	Nízká	Nízká	[37]

tab. 1 – Porovnání stávajících systémů počítání chodců v chytrých městech po celém světě [37]

Zatímco systémy v Melbourne [35] používají kamerové a laserové senzory, v Aucklandu [35], New Yorku [31], Dublinu [36] a Barceloně [32] používají pouze technologii založenou na fotopastech. Systémy jsou obvykle instalovány v místech s přístřeším nebo na pouliční sloupy. Ostatní systémy potřebují samostatné instalační konstrukce, které představují další finanční zátěž. Shromážděné údaje jsou přenášeny na server a nahrány na web pro veřejné použití. I když použití 3G sítí pokrývá širší rozsah ve srovnání k Wi-Fi nebo jiným komunikačním protokolům, spotřebovávají také nadměrně větší energii [38]. Také spotřeba energie kamerového systému je vyšší ve srovnání se senzorovými prototypy.

Přehled stávajících systémů pro počítání chodců je uveden v tab. 1. I když stávající dostupné systémy slouží plnohodnotně svému účelu, mají silná omezení skrze finanční náročnost a zachování soukromí osob. V návaznosti na tato omezení, byl vyvinut nový nízkooenergetický, levný, kompaktní a přesný systém, který je rozšířen i o další funkce [37].

V rámci získávání informací o počtech osob (obsazenosti) pro konkrétní území jsou aktuálně využívány následující metody: ruční sčítání osob, trasování pomocí vzdálených sítí, kamerové systémy a pasivní infračervené senzory PIR. Metody sběru dat budou blíže představeny v následujících kapitolách.

2.2.1 In situ – ruční sčítání pohybu osob

Jedná se o konvenční a nejčastěji využívanou metodu sběru dat o pohybu osob. Osoby jsou sčítány v předem stanovených profilech řešeného území – vstupní body. Na papírový arch sčítatel ručně zaznamenává informace o počtech osob, které do území přišli, a které z něj odešli. Mezisoučet osob se zapisuje v časových intervalech (např. po 15 minutách). Pokud se provádí dopravní průzkum veřejné dopravy, do tabulek se zapisují informace o: typu dopravního prostředku (příp. soupravy), časech příjezdů, počtech pasažérů (výstup i nástup) a času odjezdu. Tyto informace jsou poté přenášeny do elektronické formy a archivovány.

2.2.2 Trasování v síti (vzdálené sítě)

Vstupy pro tuto pravděpodobnostní metodu sběru dat o pohybu osob, jako uživatelů sítí, se sestává z časových zápisů a lokalizačních dat pocházejících ze záznamů v sítích typu: Wifi, GSM, Bluetooth nebo RFID lokalizace. Měření definujeme jako $\hat{m} = (\hat{x}, \hat{t})$, kde $\hat{x} \in \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ je odhad polohy měření (souřadnice x-y a výšková poloha měření) a \hat{t} je čas měření. V datech z přístupových bodů (PB) (Wifi routery, mobilní věže atd.) je zohledněna pozice PB a jejich hodnoty jsou diskrétní. V multilaterálních datech je měření

\hat{x} kontinuální v prostoru. Pro dané měření předpokládáme chronologicky uspořádanou časovou řadu $(\hat{m}_{j_1, i}, \dots, \hat{m}_{j_2, i}, \dots, \hat{m}_{j_{l_i}, i})$, zkráceně zapsanou jako $\hat{m}_{1:l_i, i}$, kde l_i je celkový počet měření. Přesnou polohu zařízení získáváme ze vztahu $\hat{x} = x + \xi$, který je definován jako rozložení euklidovské vzdálenosti mezi odhadem umístění \hat{x} , skutečným umístěním x a odchylkou přesnosti měření ξ . Tyto datové rámce mohou být v prvním případě konstruovány buď na základě informací poskytnutých lokalizačními protokoly (např. úroveň spolehlivosti, míra útlumu atd.), nebo samotným analytikem. Ve druhém případě je třeba navrhnout experimenty a následně povést kalibraci pohybu osoby s jejím rozložením chyb na základě již známých míst v oblasti pokrytí Wifi z experimentu.

U získaných dat jsou možné různé úrovně anonymity. Primárně dohází ke shromažďování MAC adres, jako jedinečného identifikátoru zařízení. MAC adresy mohou být zpracovány dvěma různými způsoby. Za prvé, může být spojena s uživatelským jménem prostřednictvím identifikace v systému, a tedy s identitou anebo socioekonomickými informacemi jako je pohlaví, věk atd. Nebo za druhé může být měření anonymizováno (anonymizace může být úplná nebo částečná), kde každému zařízení je přidělen konkrétní identifikátor (např. identifikační kód) [39].

2.2.3 Kamerové systémy

Videokamery

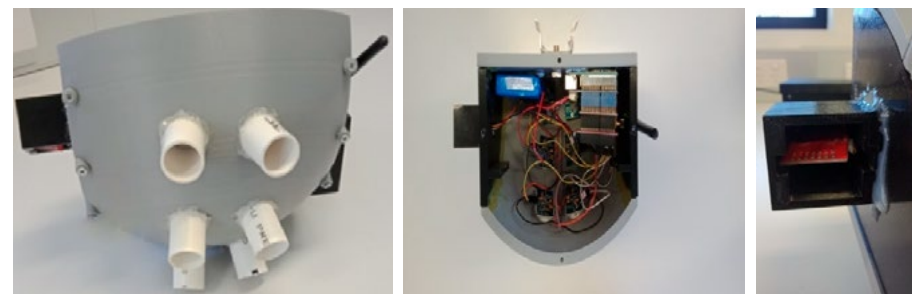
Aktuálně jednou z nejrozšířenějších metod počítání osob je použití klasických videokamer (např. instalovaných pro měření, ale také třeba i dozorových kamer v obchodních domech, na ulicích apod.). To má také širokou škálu aplikací při sledování potenciálních oblastí pro detekci neobvyklých událostí, sledování zločinců v prodejních za účelem kontroly, dohled nad seniory a nemocnými lidmi, kteří zůstávají sami doma [40]. Počet lidí v každém snímku ve videosekvenci je určen na základě algoritmu pro zpracování obrazu identifikující konkrétní natrénovaný tvar objektu (osoby) [41]. Slabou stránkou tohoto systému může být situace, kdy jsou osoby v zákrytu nebo je dav tak početný, že systém není schopen detekovat všechny osoby na snímku. Přesnost měření videokamery se snižuje vlivem okolních podmínek, jako jsou náhlé změny jasu, umístění kamery a úhlu pohledu. I přesto tyto systémy umožňují sčítání osob s 95% přesností uvnitř budov a 85% přesností pro venkovní aplikace [42]. Celkově je proces počítání lidí pomocí videokamer komplikovaný, nákladný z hlediska výpočetní techniky a dochází zde k porušení soukromí (GDPR) [43].

Termokamery

Sčítání pomocí termokamer je další metodou pro detekci osob a je využívána v řadě jiných oborů např. pro: detekci vozidel, hledání osob v noci, lokalizaci požárů uvnitř zdí a detekci přehřívání elektrických vedení apod. Termokamera funguje na způsobu detekce infračervené energie vyzařované daným objektem, což je známé jako tzv. „tepelný otisk“. K vytváření obrazu dochází na základě informací ze snímaných teplotních rozdílů. Oproti optickému zobrazování jsou termokamery výhodné především v noci, na místech bez dostatečného jasu kompozice a při sčítání méně početných davů [44]. Mezi největší negativa tohoto systému lze řadit zejména rozměr a hmotnost kamery (4-7 kg), energetickou náročnost (250 mA) a požadavek na dodatečné obvody pro provoz mikrokontrolerů s podporou IoT systému [45].

2.2.4 Pasivní infračervené senzory PIR (pyroelektrický proces).

Tato metoda sčítání je založena na senzorových uzlech, které detekují infračervené záření osoby a její směr vstupu. Spolu s tím senzory zaznamenávají i další vybraná data o environmentu: teplota, vlhkost, tlak, oxid uhličitý (CO_2). Senzory využívají pasivních infračervených senzorů (Fresnelovy čočky – PIR), které jsou speciálně upraveny pro sledování pohybu chodců.



obr. 2 – (a) forma prototypu pro umístění snímačů PIR a jiných elektronických zařízení, (b) interní prvky systému, (c) forma pro snímač environmentálních veličin [37]

Šířka pochozí komunikace je rozdělena do tří zón a každá zóna je pokryta jedním párem PIR čidel. Když chodec projde snímanou zónou, spustí oba senzory v páru. Porovnáním vstupních časů každého z párů lze určit vstupní čas a tím i směr chůze. Sledovaná data jsou přes Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) - vzdálenou síť, nahrávána na komunikační server. Pro dosažení 95% přesnosti sčítání je systém opatřen dvěma inteligentními algoritmy. První z nich rozpoznává změny v míře snímaného napětí na Fresnelově čočce, identifikující přítomnost infračerveného záření. A následně druhý, který byl vyvinut za účelem kontroly reálného počtu osob. PIR senzor při snímání průchodu vícero osob zaznamenává změnu v napětí, v důsledku čehož je prodloužen čas jeho trvání. Doba trvání je poté vyhodnocena druhým kontrolním algoritmem [37].

3 Metodika

Pro analýzu návrhu referenční stavby byl vytvořen aplikační příklad revitalizace dopravního uzlu Mendlovo náměstí v Brně, na kterém byly demonstrovány možnosti využití metod NM pro plánování a optimalizaci návrhu veřejného prostranství z pohledu kvality pěší dopravy. Pro tvorbu NM řešeného území byl využit softwarový nástroj Pathfinder [46] pro mikroskopické modelování pohybu pěších, založený na agentních technologiích zohledňující behaviorální aspekty osob pohybující se na spojitě síti modelu. Konkrétní vstupní data pro model jsou uvedena níže v kap. 3.1. Informace k obsazení modelu a provozní náležitosti byly získány zejména z terénního průzkumu. Další potřebná vstupní data – primárně týkající se behaviorálních charakteristik osob jsou čerpány z certifikované metodiky [47], směrnice RIMEA [48] a z dalších vědeckých publikací [49], [2], [50], ČSÚ [51] a geolokačních analýz [52]. Modely byly ztvárněny pro špičkový čas 7:30-8:30 (trvání doby simulace 3600 sekund) s počáteční obsazeností 500 osob.

3.1 Vstupní data numerického modelu řešeného území

Základem pro tvorbu NM jsou kvalitní vstupní data. Jako vstupní data pro NM je užíváno především projektové dokumentace pro geometrii, obsazenost a dopravních průzkumů (počet osob, časové harmonogramy a body zájmu jednotlivých pasažérů) pro sestavení obsazenosti a provozu modelu. Nejproblematictější z pohledu získávání dat pro tvorbu numerického modelu jsou vstupní data o počtu osob. Jelikož města těmito daty běžně nedisponují je velmi obtížné je získat v kvalitě a za cenu, která by mohla být považována za dlouhodobě udržitelnou. Sběr dat o pěších je v ČR aktuálně řešen primárně ručním sčítáním a směrovými průzkumy. V zahraničí se již běžně setkáváme se sčítáním osob skrze extrakci dat z videa, adres připojených zařízení, signálů mobilních

operátorů, pomocí sdílení dat nebo PIR senzorů. Většina těchto způsobů je úzce spjata s pojmem SC a IOT technologiemi viz kap. 2.2. Je nutné si ještě jednou zdůraznit, že bez těchto vstupních dat se NM neobejde a platí zde přímá úměra – čím kvalitnější a podrobnější data jsme schopni do modelu vložit, tím získáme spolehlivější výstupy a podklady pro náš budoucí návrh.

3.1.1 Sběr dat o pohybu osob – in situ

Sběr dat pro NM aplikačního příkladu probíhal ručním sčítáním v čase ranní špičky 7:30-8:30. Kde byly shromažďovány data o vytíženosti přístupových bodů na okrajích dopravního uzlu MHD. Data o vytíženosti byla poté zanesena do datových rámců a postupně zpracována pro další využití, jako vstupní data při tvorbě NM. Dalšími daty, které byly zajištěny při terénním průzkumu, jsou intervaly přechodů a příjezdů jednotlivých spojů MHD (viz Obr. 2). Principy této metody jsou blíže popsány v kap. 2.2.1.

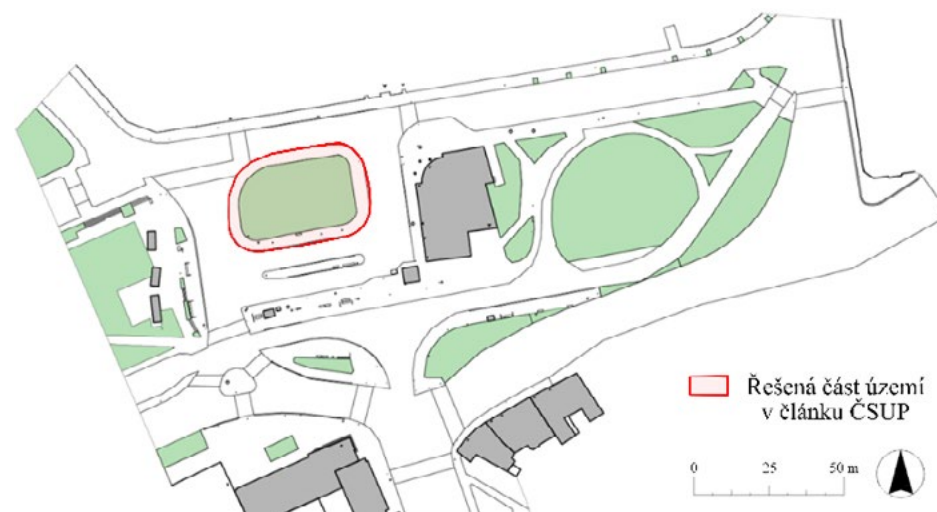
3			Měření v profilu						Přechod	
Linky č. 5,6	KTSDBN	ANTRA	Do		Z		Do	Z	Do	Z
Period h ⁻¹	18,00	4,67	I	66	51	4,4	3,4	0,07	0,06	
Obsazenost	60%	50%	II	58	46	3,9	3,1	0,06	0,05	
Ø ve voze [os]	1,30	78	III	60	51	4,0	3,1	0,07	0,06	
Výstoupí	38%	33%	IV	64	51	4,3	3,4	0,07	0,06	
Nastoupí	26%	22%	V	80	83	5,3	5,5	0,09	0,09	
Výstoupí [os h ⁻¹]	823	119	VI	26	31	1,8	2,1	0,03	0,03	
Nastoupí [os h ⁻¹]	499	72	VII	72	70	6,8	4,7	0,08	0,08	
Výstoupí [os s ⁻¹]	0,23	0,03	VIII	176	179	8,4	8,9	0,14	0,14	
Nastoupí [os s ⁻¹]	0,14	0,02	IX	169	156	16,6	10,5	0,18	0,18	
IN (s. ±800) [os s ⁻¹]	0,0229	0,0055	X	47	68	3,1	4,6	0,05	0,08	
OUT (s. ±800) [os s ⁻¹]	0,0139	0,0033	XI	38	56	2,6	3,7	0,04	0,06	
SEKVENCE [s]	299,290...	170,692...	XII	160	169	16,6	11,3	0,18	0,19	

Přechod	Zelená [s]	Cervená [s]
A-B_1	10, 88, 366, 186, 264	78, 98, 176, 284, 274
A-B_2	8, 180, 360, 540	13, 205, 395, 575
A-C	0, 100, 200, 300, 400	50, 150, 250, 350, 450
A-D_1	6, 255, 405, 555	180, 330, 480, 630
A-D_2	0, 100, 200, 300, 400	50, 150, 250, 350, 450
C-D	50, 150, 250, 350, 450	0, 100, 200, 300, 400

obr. 3 – Ukázka dat o dopravní obslužnosti na Mendlově náměstí, jednotlivé intenzity na východech dle nasbíraných dat a sekvence spínání přechodů [5]

3.1.2 Popis řešeného území – Mendlovo náměstí

Jedná se o jeden z přestupních dopravních uzlů města Brna, konkrétně Mendlovo náměstí v městské části Staré Brno. Na náměstí dochází ke křížení několika typů dopravy: automobilové, městské hromadné dopravy (trolejbusové, autobusové i tramvajové), cyklistické a pěší. Mezi negativa, která vedou k revitalizaci tohoto dopravního uzlu, patří: nedostačená plynulost provozu, malé rozptylové plochy, málo odpočinkových míst a celková neatraktivnost veřejného prostoru. Podklady pro tvorbu geometrie řešeného území byla poskytnuta KAM – jedná se o zaměření stávajícího stavu a projektovou dokumentaci připravované revitalizace. Podklady jsou poskytnuty za účelem analýzy a optimalizace návrhů dopravního uzlu.



obr. 4 – Mapový podklad stávajícího stavu Mendlova náměstí

3.1.3 Rozdělení a zastoupení osob

V numerickém modelu jsou ztvárnění chodci dle pohlaví a věku. Jejich procentuální zastoupení je čerpáno ze zdrojů a dat Českého statistického úřadu (ČSÚ).

Pohlaví a věk	%	Pohlaví a věk	%
Muži <30 let	14	Ženy 30-50 let	18
Ženy <30 let	14	Muži >50 let	18
Muži 30-50 let	19	Ženy >50 let	17

tab. 2 – Rozdělení české populace podle věku a pohlaví dle dat ČSÚ

3.1.4 Profil agenta

Každý agent představuje jednu osobu, a aby bylo dosaženo, co nejrealnějšího ztvárnění osob v modelu jsou každému agentovi přiřazeny individuální charakteristiky, jako je: šířka ramen, rychlost, reakční doba a diskretní odstup (vycházející z proxemiky). Rozměr diskretního odstupu vychází ze zóny představující prostor, ve kterém si agent udržuje určitou vzdálenost od ostatních agentů, pokud to daná situace dovoluje. Rychlost osob v modelu byla agentům přiřazena distribuční funkcí LN (0,1).

Profil	Šířka [cm]	Rychlost [m.s ⁻¹]		Diskretní odstup [cm]
		Min	Max	
Muži <30 let	51,5	0,580	1,610	0,22
Ženy <30 let	51,5	0,516	1,433	0,22
Muži 30-50 let	51,5	0,580	1,514	0,22
Ženy 30-50 let	45,6	0,516	1,371	0,22
Muži >50 let	51,5	0,671	1,392	0,22
Ženy >50 let	45,6	0,605	1,255	0,22

tab. 3 – Profily agentů v modelu [5]

3.1.5 Vzorce chování

Ke ztvárnění provozu hodnoceného místa je nutné vytvořit detailní provozní schéma vycházející z současného využití v oblasti nebo je možno čerpat z dat referenčních staveb. A pro tento konkrétní příklad byly v rámci dopravního průzkumu zaneseny do mapového podkladu jednotlivé body zájmů na území dopravního uzlu. V modelu se nachází 18 vstupů – východů na okraj geometrie, 13 přechodů a 11 zastávek MHD. Dále bylo zohledněno využívání následujících služeb: lékárna, květinářství, rychlé občerstvení, hodinářství, cukrárna, prodejna dopravního podniku města, ubytování, kanceláře, pekárna, trafika, kavárny a supermarket. Celkem model obsahuje 143 samostatných vzorců chování, které jsou stochasticky distribuovány mezi 3 hlavní struktury (smyčky) vzorců chování, tak aby se zabránilo nežádoucím zacyklením agentů. V modelu byla zohledněna možnost tvorby skupin, jakými jsou např. rodiny, kamarádi apod. Jelikož softwarový nástroj Pathfinder nedisponuje funkcí modelování veřejné dopravy, jako např. nástroj VISWALK [53], proto bylo vytvořeno speciální řešení ztvárnění dopravních prostředků. Pro každou zastávku bylo vybráno referenční vozidlo městské dopravy, které bylo v modelu ztvárněno místnostmi se sekvenčně ovládanými dveřmi, simulující dávkový nástup a výstup agentů z MHD.

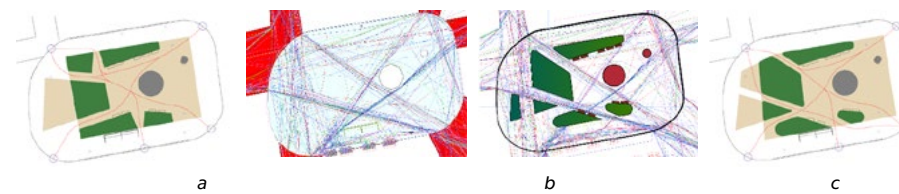
4 Výsledky

Výsledky simulací NM mohou být použity jako kvalitativní či kvantitativní podklad pro posouzení kvality pěší dopravy. Mezi hlavní používané výstupy NM pro posuzování a optimalizaci veřejného prostoru jsou: trajektorie, Level of Services (LoS, kvalita pěší dopravy), hustota osob na m², rychlost a plynulost chůze osob či jejich přestupů, nebo celkové plynulosti pěší dopravy. Další možnosti využití NM pohybu pěších pro navrhování veřejných prostor jsou v základu velmi podobné principu generativního designu. Jedná se především o stanovení dimenzí a směru vedení koridorů pochozích ploch pomocí trajektorií chodců.

V rámci ověřování je možné vytvořit více variant jednoho modelu – pro případ aplikačního příkladu dopravního uzlu se jednalo o varianty návrhu: stávající stav, revitalizovaný stav a optimalizovaný stav. Přičemž výsledky simulací stávajícího stavu slouží především pro kalibraci modelu a upozornění na aktuální kritická místa pěší dopravy řešeného území. Úpravami a simulacemi NM revitalizovaného stavu bylo dosaženo optimalizované varianty řešení s finálním návrhem změn pro odstranění kritických míst návrhu. Optimalizovaná varianta umožňuje ověření nových technických či provozních záměrů v řešeném území.

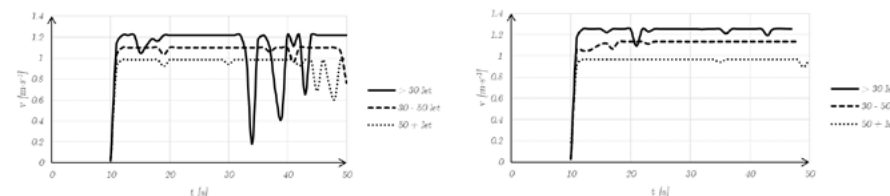
4.1 Optimalizace tvaru navrhovaného parku na Mendlově náměstí

Hlavním záměrem při optimalizování pochozích ploch je zachování leitmotivu urbanistického návrhu. Postup optimalizace ploch je založen na principu přirozených trajektorií agentů v řešeném prostoru, na základě, nichž je stanoven finální optimalizovaný tvar zeleně a rozložení koridorů pochozích ploch s maximálním přihlédnutím k přirozenému pohybu osob.



obr. 5 – Optimalizace geometrie náměstí pomocí trajektorií numerického modelu

V rámci aplikačního příkladu byly šířky jednotlivých koridorů v návrhu parku dimenzovány dle výsledků simulací a s ohledem na typologii rozměrů osob v minimální šířce 1650 mm, oproti původnímu návrhu, kde dimenze byly proměnné. Tato šířka vychází především z analogie obecné dopravy, kdy jsou vytvořeny dva proudy s opačným směrem provozu (825 mm pro každou osobu ve dvouprůdenném provozu nebo také 2,5 násobku dopravního pruhu). Tím dochází k přirozené eliminaci vzniku nežádoucích kongescí při mísení směrů proudění. Maximální rychlost, v každém z dopravních pruhů, je poté určena nejpomalejší entitou v proudu.



obr. 6 – Rychlost chůze na náměstí vybraných profilů agentů, (a – vlevo) revitalizovaná varianta, (b – vpravo) optimalizovaná varianta

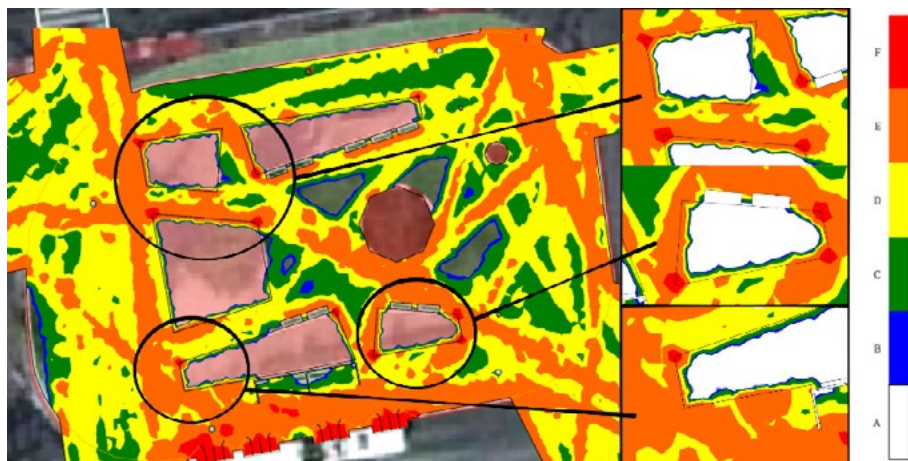
Rychlost chůze osob, a především její plynulost je jedním z hlavních měřítek kvality pěší dopravy. Z obr. 6 je patrný vliv geometrie navrhovaného prostoru na plynulost jeho pěšího provozu – obr. 6 (a) výsledky simulací návrhu revitalizace a obr. 6 (b) výsledky simulací návrhu geometrie po optimalizaci. Úpravou geometrie zelených ploch na základě výsledků z NM bylo na koridorech parku dosaženo zvýšení plynulosti (bez větších výkyvů) při pohybu pěších v řešeném území – blíže viz výsledky Tab. 4.

Varianta	Revitalizovaná	Optimalizovaná
$Q_{95/100}$	1,220	1,252
Střední hodnota	1,055	1,104
Směrodatná odchylka	0,160	0,116

tab. 4 – Statistika rychlosti chůze agentů na náměstí ($m \cdot s^{-1}$) [5]

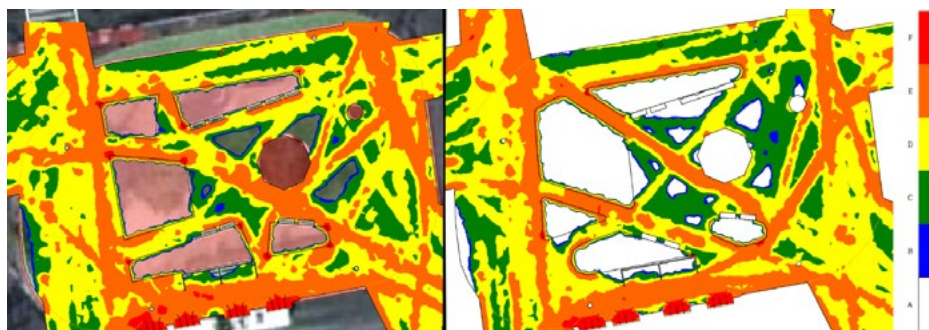
4.2 Optimalizace návrhu veřejných ploch

Pomocí agentního modelu byly vytvořeny výstupy, které jsou poté analyzovány dle následujících veličin a hodnotících kritérií jako jsou: LoS, hustota osob na m², rychlost a plynulost chůze. Na obr. 7 je uveden příklad hodnocení výsledku LoS ze simulací modelu aplikačního příkladu, na jejichž základě byla provedena detailní analýza navrhované geometrie plánované revitalizace. Díky analýze byla odhalena celá řada kritických míst se sníženou kapacitou a nedostatky prvotního návrhu.



obr. 7 – Výsledek simulace NM revitalizované varianty náměstí dopravního uzlu dle hodnocení LoS [5]

Byla navržena optimalizace, která byla následně zanesena a ověřena pomocí NM optimalizované varianty – příklad řešení je uveden viz obr. 8.



obr. 8 – Porovnání výsledků výstupů hodnocení LoS (a – vlevo) revitalizovaná varianta, (b – vpravo) optimalizovaná varianta [5]

5 Diskuse

Výsledky referenčního příkladu prokázaly myšlenku o možnosti využití ideálních trajektorií agentů simulací NM jako podkladu pro návrh/generaci „ideálních koridorů“ a ploch veřejného prostoru (případně i vnitřních prostor). NM pěší dopravy tak mohou být efektivním nástrojem pro městské architekty a urbanisty již ve fázi návrhu veřejných prostor, díky tomu lze zvyšovat kvalitu pěší dopravy, a tím pádem i životní úroveň občanů měst a obcí. Jelikož je získávání dat pro NM (především jejich sběr a implementace do prostředí softwarového nástroje) a tvorba NM stále prováděna převážně manuálně, budou při zavádění konceptu NM a SC do praxe hrát hlavní roli zejména udržitelnost a automatizace inženýrských úloh, za pomoci vyspělých technologií a pokročilých aplikací. Za tímto účelem dochází k rozvoji nových technologií a příchodu inovativní řešení pro automatický sběr dat o pěší dopravě, čímž by mohly být zajištěny klíčové zdroje stěžejních dat pro tvorbu individuálních NM, odrážející reálný provoz a situaci konkrétního zkoumaného území. Díky tomu, by mohlo být možné získávat důležité

odpovědi při ověřování změn s ohledem na konkrétní provoz a vytížení městského území. Využití těchto metod pro plánování území měst by mohlo být chápáno, jako významný příspěvek k vytváření technicky správných a zároveň funkčních řešení, jak z pohledu kapacit, plynulosti provozu, tak i z pohledu uživatele a jeho komfortu při samotném pohybu.

Budoucí směr výzkumu a aktivní zavádění těchto metod do praxe by se měly dále zaměřit na automatizaci sběru dat o chodcích (počet, rychlost, časové údaje) a jejich zpracování, pro efektivnější tvorbu NM. Další směřování při využití NM pro účely návrhu městských prostor, by mohla být bližší specifikace optimálních návrhových rozměrů, zaoblení a dalších vlastností veřejných ploch pro chodce k dosažení maximálního komfortu navrhovaných území.

6 Závěr

Zavádění konceptu SC a tvorba numerických modelů dopravy a získávání dat, je funkčním základem pro podklady urbanistům a městským architektům při navrhování, ověřování a realizaci návrhů veřejného prostranství intravilánu měst a jejich změn. Tvorbu návrhu lze navázat na získané výstupy a plně rozvinout její potenciál v prospěch veřejnosti, a to nejen z pohledu komfortu a bezpečnosti, ale i veřejných financí, které město vynakládá při dodatečných úpravách veřejných prostorů, nebo při ručním sběru dat. Tento přístup se v zahraničí postupně stává součástí procesního standardu. Znamená sice mírné zvýšení nákladů v přípravné fázi projektu, ale podstatné snížení nákladů spojených s případnými komplikacemi ve fázi realizace nebo samotného provozu stavby.

\Příspěvek vznikl za podpory interního projektu Vysokého učení technického v Brně s registračním číslem FAST-J-21-7528.

Literatura

- [1] GEHL, Jan. Město pro lidi. Brno: Partnerství, o.p.s., 2012. Dostupné z: doi:ISBN 978-80-260-2080-6.
- [2] STILL, G. Introduction to Crowd Science. CRC Press, 2014.
- [3] OKŘÍNOVÁ, Petra. Optimization Of The Evacuation Of The Music Festival Grounds Using A Numerical Model. Dostupné také z: <https://www.femtc.com/events/2020/d1-07-okrinova/>
- [4] APELTAUER, Tomáš. Soft Target Protection Analysis Using Pedestrian Simulation. Dostupné také z: <https://www.femtc.com/events/2020/d2-06-apeltauer/>
- [5] NIKOLOV, Daniel, Vedoucí OKŘÍNOVÁ, ed. Analýza dopravního uzlu s využitím simulačních nástrojů, 93 s. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky., 2021.
- [6] PALENZUELA, R., Roger VICKERMAN, ed. Superblocks Base of a New Model of Mobility and Public Space. Barcelona as an Example. International Encyclopedia of Transportation ,Elsevier, 2021, s. 249-257. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10709-2>
- [7] FINCH, Elspeth. Pedestrian Comfort Level Guidance First Edition. 1. London: Transport for London, 2019. Dostupné také z: <https://content.tfl.gov.uk/pedestrian-comfort-guidance-technical-guide.pdf>
- [8] TAI-HOON, Kim,. Smart City and IoT. Future Generation Computer Systems, 2017, , s. 159-162. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.03.034>
- [9] BIBRI, E. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. Sustainable Cities and Society, 2017, , s. 183-212. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.016>
- [10] SCHAFFERS H., Komninos. Smart Cities and the Future Internet: Towards Cooperation Frameworks for Open Innovation. Springer, Berlin, Heidelberg: Domingue J. et al. (eds) The Future Internet, 2011, . Dostupné také z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20898-0_31
- [11] JO, O.,Y. Internet of Things for Smart Railway: Feasibility and Applications. IEEE Internet of Things Journal, 2018, , s. 482-490. Dostupné z: doi:10.1109/JIOT.2017.2749401
- [12] XIONG, J., F. LI, N. ZHAO a N. JIANG. Tracking and Recognition of Multiple Human Targets Moving in a Wireless Pyroelectric Infrared Sensor Network. 2014, . Dostupné také z: <https://doi.org/10.3390/s140407209>
- [13] SHANKAR, Mohan,. Human-tracking systems using pyroelectric infrared detectors. Optical Engineering 45(10), 2006. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1117/1.2360948>
- [14] CHEN, Taihan,. Effects of tree plantings and aspect ratios on pedestrian visual and thermal comfort using scaled outdoor experiments. Science of The Total Environment, 2021, . Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149527>
- [15] KUO, Chien-Yuan,. Urban Design with the Wind: Pedestrian-Level Wind Field in the Street Canyons Downstream of Parallel High-Rise Buildings. Energies 13, no. 11: 2827. 2020. Dostupné také z: <https://doi.org/10.3390/en13112827>

- [16] HADŽIABDIĆ, Muhamed. Computer simulation of air flow and pollutant dispersion: a new paradigm for urban planning and design. 2021.
- [17] BELLOS, Vasilis. Ways for flood hazard mapping in urbanised environments: A short literature review. Water Utility Journal. 4. 25-31. 2012.
- [18] MASSIMO PALME, Riccardo. The shading effects of Green Infrastructure in private residential areas: Building Performance Simulation to support urban planning. Volume 229, 110531. 2020. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110531>
- [19] LAM, Cho. Does irrigation cooling effect intensify during heatwaves? A case study in the Melbourne botanic gardens. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, .
- [20] LIGHTHILL, M.J.,. On kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads. Proceedings of the Royal Society of. 1955.
- [21] RICHARDS, P. Shock waves on the highway. Operations research 4, 42–51. 1956.
- [22] HUGHES, R.L. A continuum theory for the flow of pedestrians. Transportation Research Part B: Methodological 36, 507 – 535. 2002.
- [23] BELLOMO, N.,. On the modelling crowd dynamics from scaling to hyperbolic macroscopic models. Math. Models Methods Appl. 2008.
- [24] MAURY, B.,. A macroscopic crowd motion model of gradient flow type. Math. Models Methods Appl. Sci. 20, 1787–1821. 2010.
- [25] COLOMBO, R.,. Pedestrian flows and nonclassical shocks 28, 1553–1567. 2005.
- [26] COLOMBO, R.M.,. class of nonlocal models for pedestrian traffic. Math. Models Methods Appl. Sci. 22, 1150023, 34. 2012.
- [27] PICCOLI, B.,. Pedestrian flows in bounded domains with obstacles. Contin. Mech. Thermodyn 21, 85–107. 2009.
- [28] TWAROGOWSKA, Monika,. Comparative Study of Macroscopic Pedestrian Models, Transportation Research Procedia. 2. 2014, s. 477-485. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.063>
- [29] HOOGENDOOM, P. Pedestrian Flow Modeling by Adaptive Control. Delft: Transport and Planning Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Stevinweg 1, 2004, , s. 95-103. Dostupné také z: <https://doi.org/10.3141/1878-12>
- [30] LIU, S.,. An Agent-Based Microscopic Pedestrian Flow Simulation Model for Pedestrian Traffic Problems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, , s. 992-1001. Dostupné z: doi:10.1109/JITS.2013.2292526
- [31] New York—Deployment of Placemeter [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://cityos.io/view/competitor/28669/New-York-Deployment-of-Placemeter>
- [32] Barcelona—Thermal Camera Based Counting [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://cityos.io/view/competitor/28671/Barcelona-Thermal-camera-based-counting>
- [33] Melbourne—Pedestrian Counting System [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://cityos.io/view/competitor/28645/>
- [34] Smart Pedestrian: Smart Cities, Smart Liverpool, Smart Pedestrian Project [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.liverpool.nsw.gov.au/business/smart-pedestrian>
- [35] Auckland—Pedestrians in the City [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://cityos.io/view/competitor/28647/Auckland-Pedestrians-in-the-City>

- [36] Dublin—Pedestrian Footfall Index in City Centre [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://cityos.io/view.competitor/28670/Dublin-Pedestrian-footfall-index-in-City-Centre>
- [37] AKHTER, F.,. IoT Enabled Intelligent Sensor Node for Smart City: Pedestrian Counting and Ambient Monitoring. 2019, . Dostupné také z: <https://doi.org/10.3390/s19153374>
- [38] NOREEN, U., A. BOUNCEUR a L. CLAVIER. A Study of LoRa Low Power and Wide Area Network Technology. Fez: In Proceedings of the International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing, 2017.
- [39] DANALET, Antonin.,. A Bayesian approach to detect pedestrian destination-sequences from WiFi signatures. 2014, , s. 146-170. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.015>
- [40] ROQUEIRO, Damian.,. Counting people using video cameras. 2007, s. 193-209. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1080/17445760601139096](https://doi.org/10.1080/17445760601139096)
- [41] LAWSON, Tony.,. A comparison between the cost effectiveness of CCTV and improved street lighting as a means of crime reduction.,. Environment and Urban Systems, 2018, , s. 17-25. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.008](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.008)
- [42] SIDLA, O. a Y. LYPETSKYY. Edestrian detection and tracking for counting applications in crowded situations. Sydney: In Proceedings of the IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance, 2006, s. 22-24.
- [43] BARTHÉLEMY, J., N. VERSTAEVEL, H. FOREHEAD a P. PEREZ. Computing Video Analytics for Real-Time Traffic Monitoring in a Smart City. 2019, . Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/s19092048](https://doi.org/10.3390/s19092048)
- [44] KRISTOFFERSEN, M.S.,. Pedestrian Counting with Occlusion Handling Using Stereo Thermal Cameras. 2016, s. 16. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s16010062>
- [45] Retail Sensing: People Counting Systems [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.retailsensing.com/smart-city-iot>
- [46] Pathfinder Technical Reference [online]. 403 Poyntz Avenue, Suite B, Manhattan, KS 66502, USA: Thunderhead Engeneering, 2020 [cit. 2021]. Dostupné z: https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2011/07/tech_ref-6.pdf
- [47] APELTAUER, Tomáš, Petr BENEŠ a Luděk VRÁNA. Aplikace pokročilých modelů pohybu osob a dynamiky požáru pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik: VG20132015120 Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Certifikovaná metodika, 2015.
- [48] RIMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 3.0.0. Wien: RiMEA, 2016.
- [49] PHEASANT, S. Bodyspace: Anthropometry. Ergonomics and the Design of the Work. CRC Press, 1996.
- [50] WEIDMANN, U. Transporttechnik der Fußgänger. Technická zpráva. nstitut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, 1993.

- [51] ČSÚ [Český statistický úřad], Výsledky sčítání lidu, domů a bytů 2011 (SLDB 2011) [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/otevrena_data_pro_vysledky_scitani_lidu_domu_a_bytu_2011_sldb_2011
- [52] ODDĚLENÍ DAT, analýz. Data.brno. © Statutární město Brno, 2020. Dostupné také z: <https://data.brno.cz>
- [53] Headquarters, PTV Visswalk: PTV Group [online]. Haid-und-Neu-Str. 15 76131: Karlsruhe Germany: PTV Group Headquarters, 2020 [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>

Informace o autorech

Ing. Petra Okřínová

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských věcí a informatiky

Petra.Okrinova@vut.cz

Ing. Daniel Nikolov

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských věcí a informatiky

Daniel.Nikolov@vutbr.cz