

# SIMULAČNÍ MODELY PĚŠÍCH PROUDŮ

## SIMULATION MODELS OF PEDESTRIAN FLOW

David Pöschl<sup>1</sup>, Lukáš Týfa<sup>2</sup>

*Anotace: Článek přináší přehled vybraných matematických modelů popisujících pěší dopravní proud. Jsou popsány jejich základní principy a jejich využití v simulačních nástrojích. V závěru je stručně popsán způsob práce s jedním ze simulačních programů.*

*Klíčová slova: simulace, pěší proud, model sociálních sil, SimWalk.*

*Summary: This paper introduces some of the mathematical models of pedestrian flow – their basic principles and using in the simulations. In the end working with one of the simulation programs is described.*

*Key words: simulation, pedestrian flow, social force model, SimWalk.*

### ÚVOD

Přibližně od 60. let minulého století se provádějí výzkumy, které se zabývají popsáním zákonitostí pěších proudů. Jejich pochopení je důležité pro účinné plánování a navrhování zařízení pro pěší dopravu, jakými jsou např. komunikační plochy na veřejném prostranství, v dopravních terminálech či v obchodních domech. Matematické modely vzniklé implementací těchto zákonitostí jsou pak využity při tvorbě simulačních nástrojů umožňujících podrobné zkoumání pěších proudů v různých situacích.

### 1. MAKROSKOPICKÉ MODELY

Většina starších prací, které se zabývají modelováním pěších proudů, se pohybuje na tzv. makroskopické úrovni, ve které se na pěší proud pohlíží jako na celek bez rozlišení jednotlivých chodců. Jejich výsledkem jsou jednak matematické vztahy mezi základními dopravními charakteristikami, jednak matematické modely popisující pohyb pěšího proudu.

#### 1.1 Weidmannův fundamentální diagram

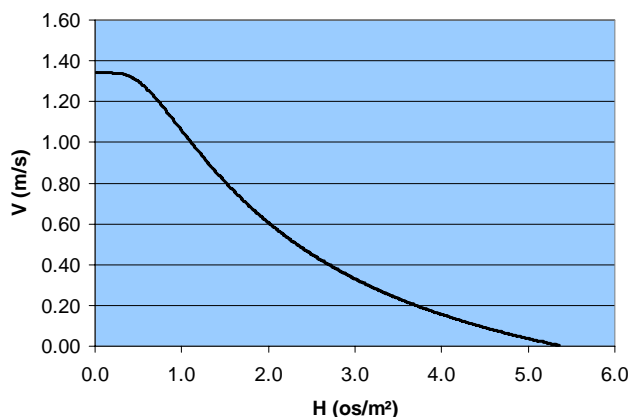
Mezi nejvýznamnější práce na toto téma patří práce německého inženýra Ulricha Weidmanna, který na základě svých studií vyjádřil vztah mezi rychlostí pěšího proudu  $V$  [m/s] a jeho hustotou  $H$  [os/m<sup>2</sup>] ve tvaru rovnice 1.

$$V = V_0 \cdot \left[ 1 - e^{-\gamma \left( \frac{1}{H} - \frac{1}{H_0} \right)} \right] \quad (1)$$

<sup>1</sup> Ing. David Pöschl, České vysoké učení technické v Praze Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů, Konviktská 20, 110 00 Praha 1, E-mail: [xposchl@fd.cvut.cz](mailto:xposchl@fd.cvut.cz)

<sup>2</sup> Ing. Lukáš Týfa, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů, Konviktská 20, 110 00 Praha 1, Tel.: +420-22435-9613, E-mail: [tyfa@fd.cvut.cz](mailto:tyfa@fd.cvut.cz)

V této rovnici parametr  $V_0$  představuje rychlost volného, neomezeného pohybu, parametr  $H_0$  představuje takovou hustotu pěšího proudu, kdy je pohyb kvůli vzájemnému ovlivňování chodců již prakticky nemožný, a parametr  $\gamma$  je kalibrační konstantou. Pro Weidmannem stanovené konkrétní hodnoty  $V_0 = 1,34$  m/s,  $H_0 = 5,4$  os/m<sup>2</sup> a  $\gamma = 1,913$  os/m<sup>2</sup> je grafické znázornění této rovnice, tzv. fundamentální diagram, zobrazeno na obrázku 1.



Zdroj: autoři podle (1)

Obr. 1 – Weidmannův fundamentální diagram

Je zřejmé, že konkrétní hodnoty diagramu se odlišují podle toho, o jaký pěší proud se jedná. Faktory mající vliv na podobu diagramu jsou např. fyziologické vlastnosti chodců, charakter dopravy, podoba infrastruktury, ale také kulturní zvyklosti nebo směr dopravního proudu. Porovnání parametrů jednotlivých druhů pěších proudů uvádí tabulka 1. Data pocházejí z různých studií, podrobněji viz (2). Nicméně Weidmannův diagram je nejčastěji citován a mnoho studií provádí srovnání svých výsledků právě s ním.

Tab. 1 – Porovnání parametrů pěších proudů

Studie	$V_0$ [m/s]	$H_0$ [os/m <sup>2</sup> ]	Země	charakter
Weidmann	1,34	5,40	Německo	různý
Navin	1,63	2,70	USA	vymezený koridor
Older	1,31	3,89	Velká Británie	nákupní třída
Tanaboriboon	1,21	5,55	Thajsko	běžná ulice

Zdroj: (2)

## 1.2 Dynamika tekutin

Jeden z prvních matematických modelů popisujících pěší proud se objevuje v práci australského vědce L. F. Hendersona z roku 1974, který upozornil na podobnost pohybu chodců a pohybu tekutin, a to překvapivě dobrým srovnáním měřených charakteristik pěšího proudu s Navierovou-Stokesovou rovnicí popisující proudění nestlačitelné tekutiny.

Na jeho práci pak navázalo mnoho dalších výzkumů, ukázalo se však, že se model založený na dynamice tekutin v mnoha oblastech jeví jako nedostatečný. Aby se dosáhlo výsledků více odpovídajících reálným situacím, bylo by třeba v modelu zohlednit vzájemné

interakce chodců, neboli přejít ke kinetické teorii tekutin, která se zabývá již jednotlivými částicemi proudu, byť jen na statistické úrovni.

## 2. MIKROSKOPICKÉ MODEL Y

Jak ukázal v 90. letech minulého století německý vědec Dirk Helbing, numerické řešení takových rovnic je sice možné, avšak velmi obtížné a pro praktické využití nevhodné. Navrhl tedy model pohybu pěších na *mikroskopické úrovni*, kdy se nepracuje s celkovým dopravním proudem, ale dochází k modelování jednotlivých chodců. Obecně rozvoj mikroskopického modelování proběhl v 90. letech minulého století, což bylo umožněno zejména vývojem výpočetní techniky sloužící jednak pro implementaci matematických modelů v počítačovém prostředí (programovací jazyky, rychlost výpočtů), jednak pro hromadný sběr dat nutných pro kalibraci modelů (videozáznam, automatická detekce).

### 2.1 Model sociálních sil

Helbing ve svém mikroskopickém modelu kromě fyzických interakcí mezi chodci a překážkami a mezi chodci navzájem zohlednil navíc sociální aspekt pěšího proudu a společně s Péterem Molnárem představil v roce 1995 tzv. *model sociálních sil*.

Model sociálních sil popisuje pohyb chodce matematickými rovnicemi, které reprezentují různé vlivy, které na chodce při pohybu působí. Ty byly určeny na základě zákonitostí pěšího pohybu odvozených z empirických pozorování a sociálních studií. Poloha chodce  $\alpha$  v prostoru je dána silou  $f_{\alpha}(t)$  (viz rovnice 2), která určuje trajektorii jeho pohybu. Sílu lze podle rovnice 2 rozložit na jednotlivé složky:

$$f_{\alpha}(t) = f_{\alpha}^0 + f_{\alpha B} + \sum_{\beta} f_{\alpha\beta} + \sum_i f_{\alpha i}(t) + \xi_{\alpha}(t) \quad (2)$$

První složku  $f_{\alpha}^0$  tvoří základní síla, která představuje motivaci chodce přesunout se do svého cíle základní rychlostí danou jeho fyziognomickými vlastnostmi, přičemž dochází v důsledku různých okolností k odchylkám od této rychlosti.

Druhá složka  $f_{\alpha B}$  představuje snahu chodce udržovat si odstup od pevných překážek (např. stěny, sloupy) nebo hranic pochozího prostoru (např. hrana nástupiště) tak, aby nedošlo k jeho zranění. Čím blíže je chodec překážce  $B$ , tím více se cítí při chůzi nepohodlně a snaží se jí vyhnout.

Podobnou odpudivou sílu představuje třetí složka  $\sum_{\beta} f_{\alpha\beta}$ , která však zohledňuje snahu chodce udržet si odstup od ostatních chodců  $\beta$  tak, aby nedošlo k narušení osobního prostoru a ovlivnění rychlosti jeho chůze. Tato síla mezi chodci není symetrická, protože chodec jednak většinou plně nevnímá situaci za sebou, jednak potřebuje pro svůj pohyb volný prostor zejména před sebou, méně pak po stranách.

Výše uvedené složky sil principiálně vycházejí z obecných pohybových zákonů, naopak další složka  $\sum_i f_{\alpha i}(t)$  zohledňuje právě sociální síly působící na chodce. V důsledku těchto sil pak dochází k určité samovolné organizaci skupiny chodců. Např. turisté nebo členové rodiny se pohybují více či méně pospolu a pokud se některý z nich v důsledku okolností musí od ostatních odchýlit, snaží se k nim následně vrátit zpět. Také různé situace či stavy okolí přitahují pozornost chodce a tím ovlivňují jeho chůzi, např. orientační tabule. Takové

přitažlivé síly atraktivit  $i$  působí opačným směrem než síly odpudivé, navíc mají mnohem větší dosah.

Poslední složka  $\xi_a(t)$  představuje náhodnou složku, která zohledňuje individualitu v chování každého jedince.

## 2.2 Princip nejmenšího úsilí

Jiný způsob modelování pěšího pohybu navrhl britský matematik Keith Still zabývající se studiem dynamiky pěšího davu. Pro každého modelovaného chodce je na základě jeho aktuální pozice a jeho blízkého okolí určen směr a rychlost dalšího pohybu. Výpočet je založen na tzv. *principu nejmenšího úsilí*, který v roce 1949 poprvé popsal americký lingvista G. K. Zipf a podle kterého je přirozené lidské chování určeno snahou o vynaložení co nejmenší energie. Samotný model pak každému chodci  $x$  určí možnou trasu  $P_x$ , která je ohodnocena cenou  $U(P_x)$  vyjadřující úsilí nutně vynaložené na její projití, např. na základě rychlosti, doby a změny zrychlení pohybu. Výsledné trasy všech chodců jsou pak vybrány tak, aby celková cena daná součtem cen tras všech chodců  $U = U(P_1) + U(P_2) + \dots + U(P_n)$  byla minimální.

## 3. PŘEHLED SIMULAČNÍCH NÁSTROJŮ

Provádění simulací pěších proudů umožňuje posoudit konkrétní dopravní infrastrukturu v různých podmínkách. Již v projektové přípravě lze porovnat jednotlivé varianty pěších komunikací z hlediska kvality pohybu. Posuzuje se kapacita komunikačních ploch a koridorů, možnost tvorby front nebo hrdel, potřebné transportní časy mezi zdrojem a cílem cesty, dostatečná velikost rozptylových ploch a počet východů apod. U stávající infrastruktury lze stanovit zda nedojde k problémům v mimořádných situacích, např. při evakuaci osob z budovy, při hromadných akcích nebo při omezení funkčnosti infrastruktury (porucha eskalátorů, výtahů). Simulování tak může přispět k omezení rizika zranění osob, k úspoře investičních prostředků či ke zvýšení komfortu pohybu.

Simulační programy pěších proudů představují implementaci teoretických modelů a jejich využití v konkrétních podmínkách. Jde o poměrně objemné nástroje, jejichž součástí bývá grafické prostředí pro tvorbu dopravní infrastruktury (více či méně zjednodušené), různé databáze obsahující populační skupiny simulovaných chodců s parametry jejich chování (např. rychlost chůze, zrychlení, fyzické rozměry těl nebo druh cesty) a nástroje pro vyhodnocování výsledků simulace.

Naprostá většina simulačních nástrojů pěších proudů pracuje na mikroskopické úrovni, kdy se nemodeluje celý dopravní proud jako celek, ale jsou modelovány pohyby jednotlivých chodců. To umožňuje velmi podrobně a reálně simulovat pohyby pěších v různém prostředí a studovat parametry dopravních proudů. Aby výsledky odpovídaly realitě, je třeba při vývoji simulace věnovat pozornost její kalibraci a srovnání výsledků s početnými záznamy reálných situací.

Simulační programy lze rozdělit do dvou základních skupin. V první skupině se nacházejí ty programy, které jsou zaměřeny primárně na simulaci osob při evakuaci, ve druhé pak ty, které se zabývají simulací „běžného pohybu“. Evakuačních programů existuje větší

počet (např. Simulex, FDS+Evac, Exodus), jejich použití je však omezené právě pro speciální chování modelovaných chodců. Ostatní programy nabízejí širší uplatnění a možnosti simulace, ale jejich vývoj je náročnější. Většina simulačních programů, které lze prakticky využít, jsou komerčními produkty, některé z nich nabízejí k vyzkoušení omezené verze. Přehled vybraných významných programů je uveden v následující tabulce 2.

Tab. 2 – Přehled simulačních nástrojů

Program	Výrobce	Použitý model
VISSIM	PTV AG	model sociálních sil
SimWalk	Savannah Simulations AG	model sociálních sil
Legion Studio	Legion Ltd.	princip nejmenšího úsilí
Urban Analytics Framework	Quadstone Paramics Ltd.	princip nejmenšího úsilí

Zdroj: výběr autorů

### 3.1 SimWalk

Program SimWalk je simulátor založený na principu mikrosimulace pěšího pohybu. Dokáže modelovat pohyb chodců v daném prostředí a následně vyhodnocovat různé parametry, např. dosažené hustoty pěšího proudu, přepravní časy nebo zpoždění. Výsledky lze využít jednak pro optimalizaci dopravní infrastruktury z hlediska komfortu cestujícího, jednak pro posouzení reálné doby přemístění (evakuace objektů, přestupní vazby apod.).

Jádro simulace programu SimWalk je založeno na kombinaci modelu sociálních sil a algoritmu nalezení nejkratší trasy. Na základě daného prostředí je vytvořeno potenciálové pole, ve kterém se simulovaní chodci pohybují z místa s vyšším potenciálem do míst s nižším potenciálem. Přesná trasa je pak výslednicí sil v potenciálovém poli daném překážkami a ostatními chodci.

Vstupními parametry simulace jsou zejména prostředí simulace, které lze importovat z formátu DXF nebo vytvořit v implementovaném grafickém prostředí, a chování chodců. Zdroje a cíle cest chodců jsou definovány pomocí oblastí s různými parametry, např. frekvence přístupu chodců nebo kapacita. Lze také určit oblasti, ve kterých dochází k časovému zdržení chodců nebo ovlivnění jejich rychlosti, a tím modelovat např. prostor u pokladen nebo turniketů. Pro pohyb mezi různými výškovými úrovněmi je možné použít schody, eskalátory a výtahy.

Vlastnosti chodců jsou definovány pomocí profilů. Každý profil je určen velikostí modelovaného chodce (šířka v ramenech, výška), podílem mužů a žen, věkem, rychlostí chůze a omezením pohybu, jakým je např. kufř, nákupní taška, ale též použití hole a invalidního vozíku nebo také stav opilosti (podrobněji viz obrázek 2). Program má předdefinovány nejčastější profily, kromě obecného profilu to jsou např. profil cestujícího jezdícího denně, cestujícího jezdícího výjimečně, nakupujícího nebo radikálního sportovního fanouška. Profily lze však libovolně upravovat s ohledem na různá místní specifika.

The screenshot shows a configuration window for pedestrian agents. It is organized into several sections:

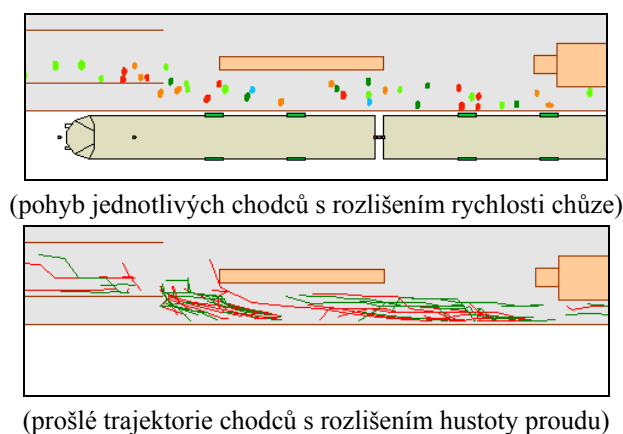
- Agents region**: A dropdown menu.
- Agents activity**: A dropdown menu.
- Agents speed**: Two spinners for speed, set to 141 and 25 cm/s.
- Agents height**: Two spinners for height, set to 178 and 6 cm.
- Agents age**: Two spinners for age, set to 29 and 7 years.
- Agents breadth**: Two spinners for breadth, set to 44 and 3 cm.
- Agents gender**: A slider between M% (54) and F% (46).
- Agents priority**: A dropdown menu set to 'Normal'.
- Unit system**: A dropdown menu set to 'Metric'.
- Agents handicaps (reduction of mobility)**: A list of checkboxes including Assistant, Baby carrier, Backpack (checked), Blind, Buggy, Cane, Child, Couple, Dog (checked), Drunk, Handcart (checked), Pregnant, Shopping bag, Ski / board, Sports bag (checked), Suitcase (checked), and Wheelchair.
- Agents styles**: A list of checkboxes including Business, Casual (checked), Couture, Militant, Sportive (checked), and Uniform.
- Agents profile**: A dropdown menu set to 'Traveller'.

Buttons for 'Close', 'Default', and 'Save' are located at the bottom right.

Zdroj: (5)

Obr. 2 – Parametry profilu chodců

Během simulace lze průběžně sledovat pohyb jednotlivých chodců nebo jejich prošlé trajektorie s možností barevného rozlišení na základě aktuálních charakteristik, např. rychlost chůze nebo hustota proudu.



(pohyb jednotlivých chodců s rozlišením rychlosti chůze)  
(prošlé trajektorie chodců s rozlišením hustoty proudu)

Zdroj: (5)

Obr. 3 – Záznam simulace

Po dokončení simulace lze vytvářet různé statistické výstupy. V tabulce nebo v grafu lze zobrazit parametry pohybu chodců, zejména jejich průměrnou a maximální rychlost, ušlou vzdálenost a dobu chůze. Je též možné provádět kdekoliv v modelu běžná profilová měření pěšího proudu.

Program umožňuje velmi názorně a intuitivně simulovat pěší proudy v daném prostředí. Před spuštěním simulace je však třeba podrobně stanovit parametry simulované populace, tedy podíl jednotlivých profilů chodců a jejich vlastnosti, aby výsledky simulace, určené z největší míry právě chováním chodců, odpovídaly reálným situacím.

#### 4. ZÁVĚR

Výzkum modelování pěších proudů se v posledních dvaceti letech zaměřuje zejména na mikroskopickou úroveň problému. Vzniklo mnoho modelů, jejichž aplikace v simulačních nástrojích umožňuje zkoumat parametry dopravní infrastruktury a podmínky pohybu pěších proudů na poměrně podrobné úrovni. Kromě tvorby samotných modelů má nezanedbatelný význam též jejich kalibrace a upřesňování vstupních parametrů, neboť jedině na základě realistických parametrů je možné obdržet realistické výsledky simulací.

*Článek vznikl za podpory projektu SGS ČVUT č. SGS10/215/OHK2/2T/16 „Optimalizace uspořádání zařízení pro přepravu osob v přestupních uzlech veřejné hromadné dopravy“ (<http://vlakysgs.fd.cvut.cz>).*

#### POUŽITÁ LITERATURA

- (1) WEIDMANN, U. Transporttechnik der Fussgänger. *Schriftenreihe des IVT Nr. 90*, ETH Zürich: Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, 1993. Dostupné z: <[http://www.ped-net.org/uploads/media/weidmann-1993\\_01.pdf](http://www.ped-net.org/uploads/media/weidmann-1993_01.pdf)>.
- (2) PED-NET.ORG. *Ped-net.org, Free Online-Database for experimental measurements and specifications* [online]. Publikováno 15.10.2008. Dostupné z: <<http://www.ped-net.org>>.
- (3) HELBING, D., MOLNÁR, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 1995, roč. 51, č. 5, s. 4282–4286. ISSN 1550-2376.
- (4) STILL, K. *Crowd dynamics*. Warwick: University of Warwick, 2000. Disertační práce. Dostupné z: <<http://www.gkstill.com/PhDThesis.html>>.
- (5) SimWalk [počítačový program]. Ver. 3.7. Savannah Simulations AG.