

Simuliranje kretanja grupa pešaka pod usmerenjem vođe

Cilj ovog rada je simuliranje kretanja pešaka raspoređenih u grupe sa vođom. Korišćen je model ćelijskog automata. Svaku grupu čini određen broj pešaka od kojih je tačno jedan vođa. Kretanje pešaka se zasniva na agregaciji (kretanju ka centru grupe kojim grupe održavaju krutu strukturu) i kretanju ka zadatom cilju. Podvrste kretanja ka zadatom cilju su kretanje ka izlazu, kada pešak zna gde se izlaz nalazi, i praćenje, kada se pešak kreće ka vođi. Pešacima su zadate verovatnoće za oba aspekta kretanja. Uvedena je mogućnost zamene pozicija pešaka kako bi se oni mimošli ako se formira zastoj. Simulirane su situacije evakuacije za različit broj grupa pešaka, verovatnoće kretanja, strukture grupa. Razmatrani su slučajevi kada je praćenje pristuno kao aspekt kretanja i kada nije. Uočeno je da pojave agregacije i praćenja usporavaju evakuaciju, dok je povećanje broja grupa ubrzava, što se slaže sa situacijama iz stvarnog života. Zaključeno je da se variranjem verovatnoća i drugih parametara modelom mogu simulirati različite realne situacije, npr. kada je pešacima primarno da budu blizu članova svoje grupe ili da što pre napuste prostoriju.

Uvod

Istraživanja na temu kretanja pešaka su već dugo aktuelna u raznim naučnim disciplinama. Ta istraživanja su uglavnom bila empirijske prirode i proučavana su najčešće ponašanja ljudi prilikom kretanja u različitim situacijama (npr. evakuacija, šetnja). Trenutno je pažnja usmerena na probleme modelovanja i simuliranja kretanja pešaka. Prednost ovakvih istraživanja je mogućnost simulacije situacija iz realnog života, koje nije moguće ispitati eksperimentalno zbog nemogućnosti izvođenja oglada. Rezultati ovih istraživanja našli su primenu u organizaciji masovnih događaja (festivali, koncerti, utakmice), projektovanju prostora za veliki broj ljudi, optimizaciji evakuacije prilikom dramatičnih situacija (npr. požar, teroristički napad) (Qiu i Hu 2010).

Zlatan Vasović (2001),
Čačak, Ratka
Parezanovića 15,
učenik 2. razreda
Gimnazije u Čačku

Maja Stošić (2000),
Čačak, Svetog Save
17/22, učenica 3.
razreda Gimnazije u
Čačku

MENTORI:

Stevan Radanović,
High Tech Engineering
Center, Beograd

Daniel Silađi, École
normale supérieure de
Lyon, Francuska

Posmatrajući situacije iz svakodnevnog života kao što su kulturno-obrazovne manifestacije, kretanje porodice kroz park ili učenika u blizini škole moguće je uočiti fenomen grupisanja pešaka. Grupisanje pešaka značajno utiče na kretanje pešaka zbog težnje da članovi grupe budu međusobno blizu u toku kretanja. Zbog toga u modelima kretanja pešake nije moguće uvek posmatrati kao zasebne individue, već je potrebno modelovati i povezanost pešaka (Qiu i Hu 2010).

Veliki broj modela pešačkog saobraćaja se zasniva na fizičkim principima, kao što su Lattice gas model, model socijalnih sila, model magnetnih sila, model zasnovan na dimanici fluida, granularnim materijalima i model ćelijskog automata. Svi ovi modeli, iako zasnovani na pojavama iz fizike, pokazali su sposobnost predviđanja kretanja pešaka (Guo i Huang 2008).

Cilj ovog rada je razvoj modela kretanja pešaka baziranog na modelu ćelijskog automata. U modelu je primenjen i fenomen grupisanja pešaka za različite stepene povezanosti pešaka, ali i za različite strukture grupa. Dodatno je ispitan i fenomen postojanja vođe grupe koga ostali pešaci prate.

Metod

Ćelijski automati

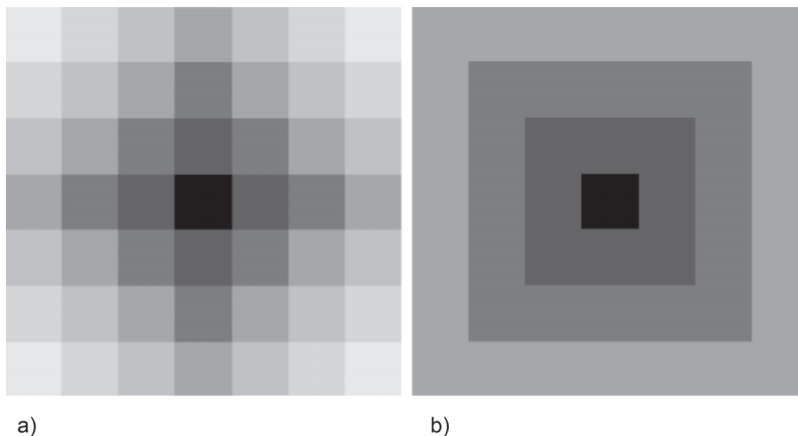
Termin „ćelijski automati” se odnosi na klasu matematičkih modela koji se koriste za proučavanje problema u teorijskoj matematici, fizici, biologiji i raznim drugim oblastima (Wolfram 1983).

Ćelijski automati su matematičke idealizacije fizičkih sistema u kojima su prostor i vreme diskretni, a fizičke veličine poprimaju konačan skup diskretnih vrednosti. Čine ih pravilne uniformne rešetke sa diskretnom varijablom na svakom polju odnosno ćeliji. Stanje automata je u potpunosti određeno vrednostima varijabli svake ćelije i menja se kroz diskretne vremenske korake. Za svaku ćeliju u automatu su određene njene susedne ćelije koje se nalaze u njenom neposrednom okruženju i svojim stanjem utiču na njeno stanje (Wolfram 1983).

Stanje svih ćelija se menja istovremeno primenom unapred definisanih pravila. Kada je zadato početno stanje automata vremenski brojač se postavlja na 0, a nakon svake primene pravila, nezavisno od toga da li je došlo do promene stanja ćelija, vremenski brojač se povećava za 1. Ispostavlja se da neverovatno jednostavna pravila ažuriranja mogu proizvesti ekstremno složene dinamike kada se primenjuju na ovakav način (Wolfram 1983).

Dva osnovna tipa susedstva koja formiraju ćelije komšije u dvodimenzionalnim ćelijskim automatima su fon Nojmanovo i Murovo susedstvo.

Fon Nojmanovo susedstvo čini centralna ćelija sa susednim ćelijama koje se nalaze ispod, iznad, levo i desno od nje. Ako centralna ćelija ima koordinate (x, y) , koordinate njenih ćelija komšija u fon Nojmanovom susedstvu su $(x + 1, y)$, $(x - 1, y)$, $(x, y + 1)$, $(x, y - 1)$.



Slika 1.
 a) Fon Nojmanovo susedstvo;
 b) Murovo susedstvo.

Figure 1.
 a) Von Neumann neighborhood;
 b) Moore neighborhood.

Murovo susedstvo čini svih 8 susednih ćelija koje okružuju posmatranu ćeliju. Ako centralna ćelija ima koordinate (x, y) , koordinate ćelija komšija po Murovom susedstvu bi bile $(x+1, y)$, $(x+1, y+1)$, $(x+1, y-1)$, $(x-1, y)$, $(x-1, y-1)$, $(x-1, y+1)$, $(x, y-1)$, $(x, y+1)$ (Wolfram 1983).

U dvodimenzionalnim ćelijskim automatima definisane su dve metrike, odnosno dva tipa udaljenosti od posmatrane ćelije:

1. Menhetn udaljenost: ćelije sa udaljenošću 1 od posmatrane ćelije pripadaju fon Nojmanovom susedstvu;
2. Čebiševljeva udaljenost: ćelije sa udaljenošću 1 od posmatrane ćelije pripadaju Murovom susedstvu (Wolfram 1983).

Na slikama su različitim nijansama sive prikazane vrednosti Menhetn (slika 1a) i Čebiševljeve udaljenosti (slika 1b) od posmatrane ćelije (najtamnija nijansa).

Prilikom predstavljanja pešaka, u ćelijskom automatu za svaku ćeliju su karakteristična tri stanja: nepopunjena ćelija (bez pešaka u njoj) i popunjena ćelija (sa jednim pešakom u njoj) i ćelija koja predstavlja izlaz.

Modeliranje grupa pešaka

Pešaci su raspoređeni u grupe, pri čemu svaka grupa ima tačno jednog vođu. Svaka grupa ima svoj ID i svaki pešak svoj lični ID. U grupi se razlikuju dve vrste pešaka: vođa i obični pešaci. Pešaci su u ćelijskom automatu predstavljeni preko svog ID-a i ID-a grupe kojoj pripadaju.

Za svakog pešaka u grupi postoje dva aspekta kretanja: agregacija i kretanje ka ciljnoj ćeliji.

Agregacija predstavlja kretanje pešaka ka centru grupe kojoj on pripada. Koordinate centra grupe (CG) su određene formulama:

$$CG_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{pozicija pešaka } x)_n$$

$$CG_y = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{pozicija pešaka } y)_n$$

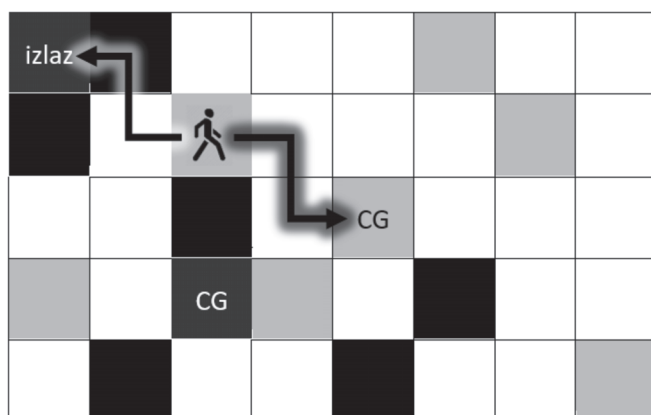
gde je N broj pešaka posmatrane grupe (Qiu i Hu 2010).

Agregacija je kretanje kojim pešaci teže da im rastojanje od centra grupe bude minimalno. Na ovaj način je predstavljena težnja pešaka za minimalnom udaljenošću od članova svoje grupe. Agregacijom je kao aspektom kretanja modelovana povezanost pešaka, što odgovara realnim situacijama (npr. prijatelji koji idu zajedno jedan pored drugog, a ne svako za sebe) (Qiu i Hu 2010).

Za kretanje ka ciljnoj ćeliji razlikuju se dva slučaja:

1. kretanje ka izlazu, ako je pešak informisan gde se izlaz nalazi;
2. praćenje, ako pešak nije informisan gde se nalazi izlaz, već prati vođu.

Strukture grupa su su pešacima zadate agregacijom i praćenjem kao aspektima kretanja. Ako nijedna od ove dve vrste kretanja ne bi bila prisutna model bi odgovarao modelu negrupisanih pešaka.

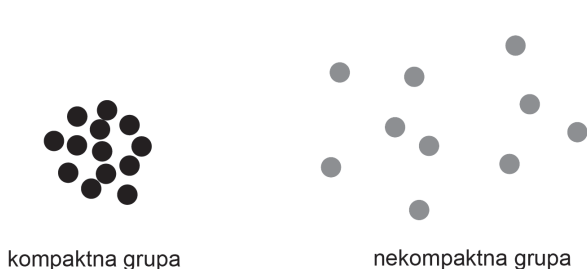


Slika 2. Grafički prikaz obe vrste kretanja (CG – centar grupe)

Figure 2. Graphic representation of both movement types (izlaz – exit; CG – group center)

Obe vrste kretanja (slika 2), agregacija i kretanje ka ciljnoj ćeliji, odvijaju se sa određenom verovatnoćom koja je varirana u simulaciji. Variranjem verovatnoća su simulirane različite situacije iz realnog života. Većom verovatnoćom za kretanje ka ciljnoj ćeliji predstavljane su situacije evakuacije, a većom verovatnoćom za agregaciju predstavljano je kretanje grupa povezanih pešaka kao što su porodice i prijatelji. Variranjem verovatnoće za dva aspekta kretanja modelovan je stepen povezanosti pešaka, odnosno čvrstina njihove veze.

Na početku simulacije zadate su dimenzije prostora u kom se nalaze pešaci, gustina pešaka u prostoru, broj grupa pešaka, pozicija izlaza, verovatnoće za aspekte kretanja, kao i uslov praćenja: da li je prisutno praćenje kao vid kretanja ili ne. Broj pešaka je određen proizvodom površine prostora i zadate gustine pešaka u prostoru. Pešaci se u svakoj od simulacija kreću po Fon Nojmanovom susedstvu. Raspoređivanje pešaka u grupe nekompaktne strukture je ostvareno funkcijom uniformne raspodele, a u grupe kompaktne strukture funkcijom normalne raspodele (slika 3).



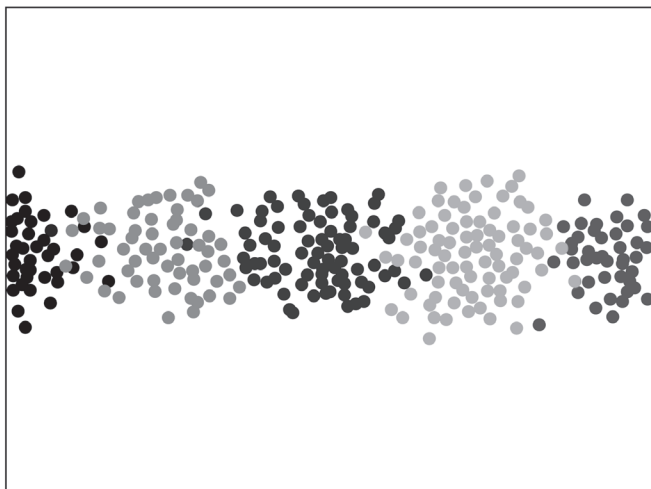
Slika 3. Šematski prikaz grupa sa kompaktnom i nekompaktnom strukturom

Figure 3. Schematic representation of groups with compact (left) and noncompact (right) structure

Prvo su raspoređeni centri grupa, a pojedinačni pešaci su se grupisali oko centra (slika 4). Pozicije pešaka su određene uzorkovanjem vrednosti funkcijama normalne ili uniformne raspodele. Kako se površine koje grupe zauzimaju ne bi preklapale, u slučaju kompaktne strukture grupe standardna devijacija normalne raspodele određivana je formulom:

$$\sigma = \frac{A}{2 \cdot G}$$

gde je A dimenzija prostora, a G broj grupa.

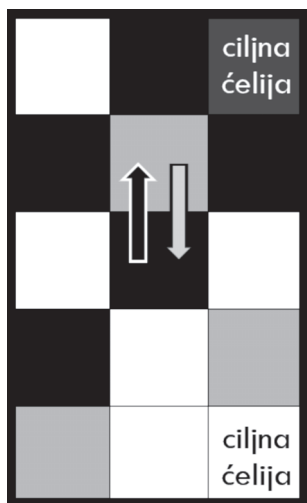


Slika 4. Raspored 5 grupa pešaka na početku simulacije

Figure 4. Distribution of 5 pedestrian groups at the beginning of the simulation

Takođe, da se površine koje grupe zauzimaju ne bi preklapale, udaljenost između dva centra grupa je zadavana formulom $d = 2 \cdot \sigma$.

Na osnovu verovatnoća za oba aspekta kretanja, pešaci u svakom koraku biraju da li će se kretati ka centru grupe ili ka ciljnoj ćeliji, koja je ili pozicija vođe ili pozicija izlaza. Centar grupe ili ciljna ćelija postaju odabrana ćelija za kretanje tog pešaka. U svakom vremenskom koraku se za svakog pešaka proverava da li u njegovom susedstvu postoji nepopunjena ćelija čije je rastojanje od odabrane ćelije manje od njegovog trenutnog rastojanja do te ćelije. Ukoliko postoji, pešak će se pomeriti u nju. Ćelija u kojoj se pešak nalazio u prethodnoj iteraciji će biti nepopunjena ili će se u nju pomeriti drugi pešak, koji će na taj način smanjiti rastojanje do svoje



Slika 5. Situacija kada se dešava zamena pozicije pešaka

Figure 5. Situation when the position swap of the pedestrians occurs

odabrane ćelije. Pešak ćeliju u kojoj se nalazi može menjati samo jednom u toku jednog koraka kako bi maksimalna brzina kretanja pešaka bila jedna ćelija u jednom koraku (Feliciani i Nishinari 2016). Ako takva ćelija ne posoji, pešak proverava se da li se u njegovom susedstvu nalazi drugi pešak sa kojim bi zamenio pozicije. Da bi dva pešaka zamenili svoje pozicije, potrebno je da zamenom pozicija oba pešaka smanje rastojanja do svojih odabranih ćelija.

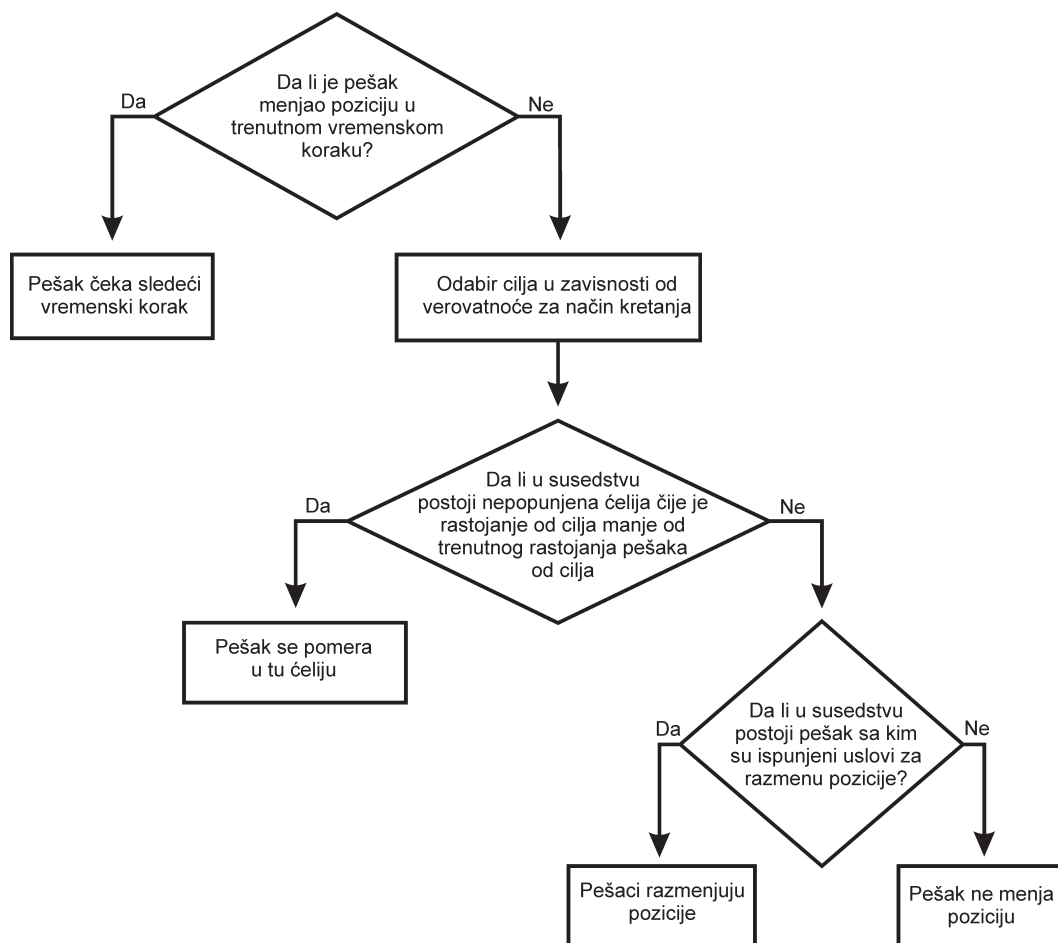
Na slici 5 je prikazana situacija kada su ispunjeni uslovi za zamenu pozicije pešaka. Strelicama je označen smer zamene pozicija dva pešaka obeleženih ćelijom crne i sive boje. Nijedan od pešaka u svom susedstvu nema nepopunjenu ćeliju u koju bi mogao da se pomeri i na taj način smanji svoju udaljenost od ciljne ćelije. Odgovarajuće ciljne ćelije su označene tamnijom nijansom boje kojom je označen pešak. Ukoliko zamene pozicije, pešaci će smanjiti svoje udaljenosti od ciljnih ćelija.

Prethodno navedena pravila kretanja grafički su prikazana na slici 6.

Rezultati i diskusija

Razmatrani su uticaji strukture grupe, broja grupa, praćenja i agregacije. Druge karakteristike (dimenzije prostora, gustina i tip susedstva) ne utiču kvalitativno na razmatrane zavisnosti (Feliciani i Nishinari 2016). Iz tog razloga su za sve simulacije konstantne dimenzije prostora (100×100), gustina pešaka (0.05) i tip susedstva (Fon Nojmanovo). Navedene vrednosti za parametre su korišćene radi efikasnosti izvršavanja same simulacije. Vreme je računato kao broj koraka u ćelijskom automatu. Smatrano je da između dve vrednosti na grafiku postoji statistički značajna razlika ako nema preklapanja između njih, uračunavajući i odgovarajuće greške.

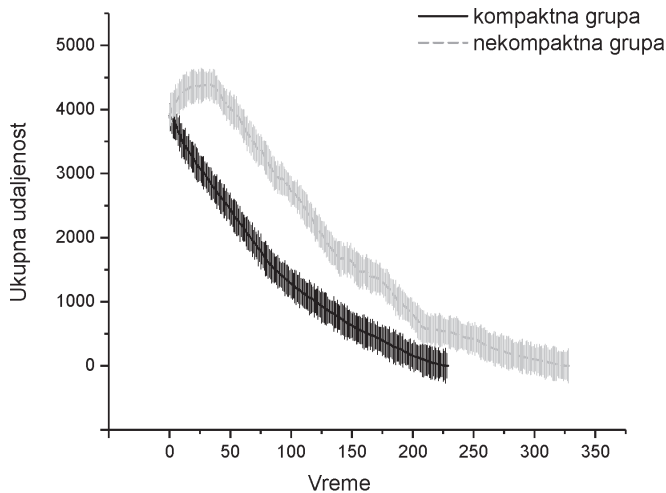
Grafik na slici 7 prikazuje rezultat simulacije sa praćenjem kao vidom kretanja, što znači da samo vođa grupe zna gde se nalazi izlaz. Za verovatnoću kretanja ka cilju uzeta je vrednost 0.75, i pri kompaktnoj i pri



Slika 6. Uprošćen algoritam kretanja svakog pešaka

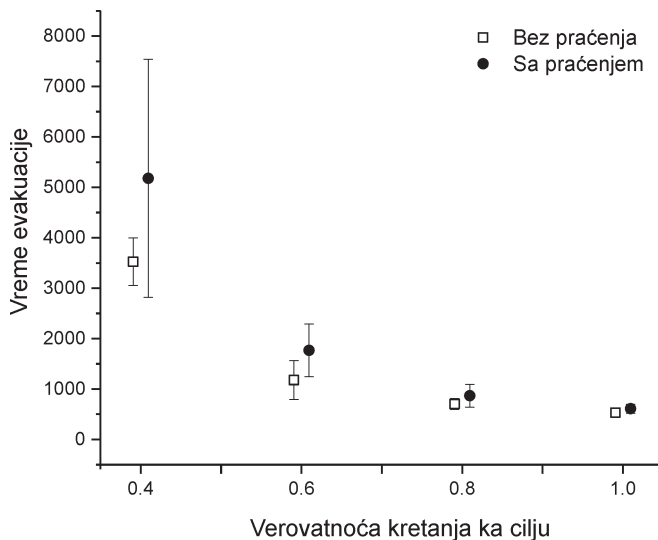
Figure 6. Simplified algorithm of the movement of every pedestrian

nekompaktnoj strukturi grupe. Ukupna udaljenost svih pešakâ u grupi od izlaza računata je kao suma udaljenosti od izlaza svakog pojedinačnog pešaka te grupe. Vrednosti povezane linijama su srednje vrednosti nakon 50 simulacija i naznačene su standardne devijacije. Kao što se vidi sa grafika, u slučaju kada je grupa kompaktna, ukupna udaljenost od izlaza stalno se smanjuje tokom simulacije, i za evakuaciju svih pešaka takve grupe je potrebno manje vremena od evakuacije pešaka nekompaktne grupe. Nekompaktna grupa na početku simulacije povećava svoju ukupnu udaljenost od izlaza, što je posledica agregacije i praćenja kao aspekata kretanja. Agregacijom se pešaci kreću ka centru svoje grupe, a praćenjem ka vođi. Oba vida kretanja ih udaljavaju od izlaza, ali formiraju kompaktnu strukturu grupe. Potom pešaci, prateći vođu, smanjuju svoju udaljenost od izlaza.



Slika 7. Vremenska zavisnost ukupne udaljenosti pešaka od izlaza u slučaju kada uz prisutno praćenje verovatnoću kretanja ka cilju iznosi 0.75. Vertikalnim crtama je označena standardna devijacija.

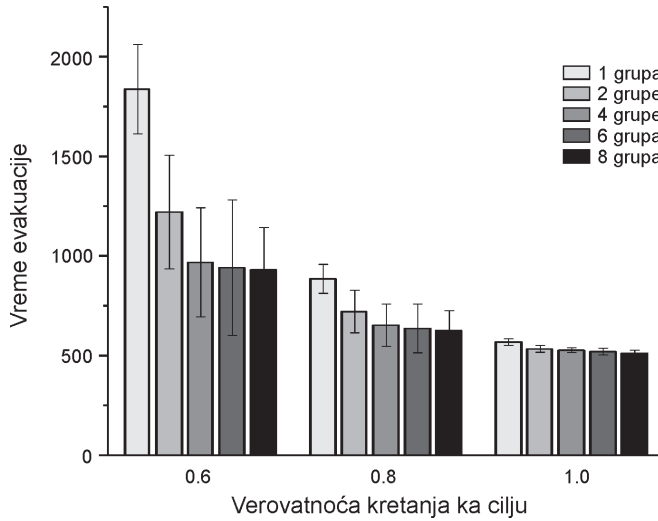
Figure 7. Dependence of total pedestrian distance from the exit on time. Vertical bars denote standard deviation. Black full line – compact group; Grey dotted line – noncompact group.



Slika 8. Zavisnost vremena evakuacije od verovatnoće kretanja ka cilju. Vertikalnim crtama je označena standardna devijacija.

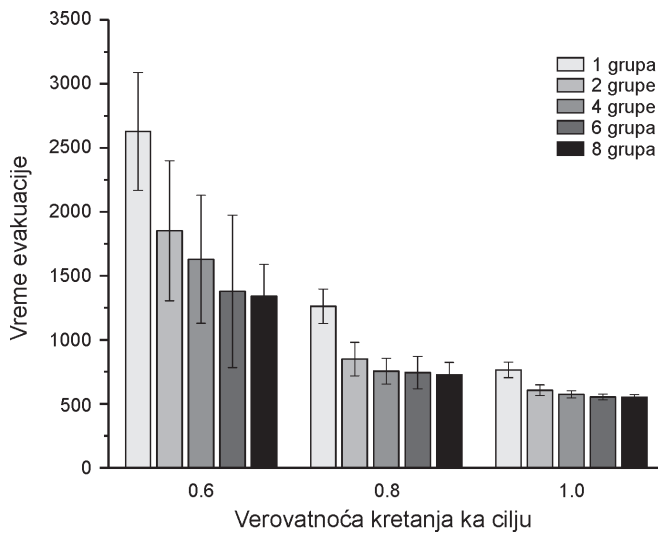
Figure 8. Dependence of evacuation time on probability of movement towards the target. Vertical bars denote standard deviation. White square – without following; black circle – with following.

Na slici 8 je predstavljena zavisnost vremena evakuacije dve grupe pešaka u zavisnosti od verovatnoće kretanja ka cilju za dva slučaja: u slučaju praćenja i bez praćenja. Linijom su povezane srednje vrednosti vremena evakuacije dok ucrtane greške označavaju opseg između minimalne i maksimalne dobijene vrednosti za vreme evakuacije nakon 50 simulacija. Sa prisutnim praćenjem i vrednošću verovatnoće kretanja ka cilju 0.5, simulacija ne konvergira u vremenu koje ima fizičkog smisla, što pokazuje i veliki opseg vrednosti (maksimum je isečen radi preglednosti). Srednja vrednost vremena evakuacije pokazuje da se u proseku pešaci brže evakuiraju kada je praćenje isključeno. To je i očekivano, jer tada svi pešaci znaju gde je izlaz. S druge strane, opseg vrednosti pokazuje da ta razlika nije statistički značajna, jer srednje vrednosti sa praćenjem upadaju u opseg greške bez praćenja i obrnuto.



Slika 9. Zavisnost vremena evakuacije od verovatnoće kretanja ka cilju u slučaju kretanja bez praćenja. Vertikalnim crtama je označena standardna devijacija.

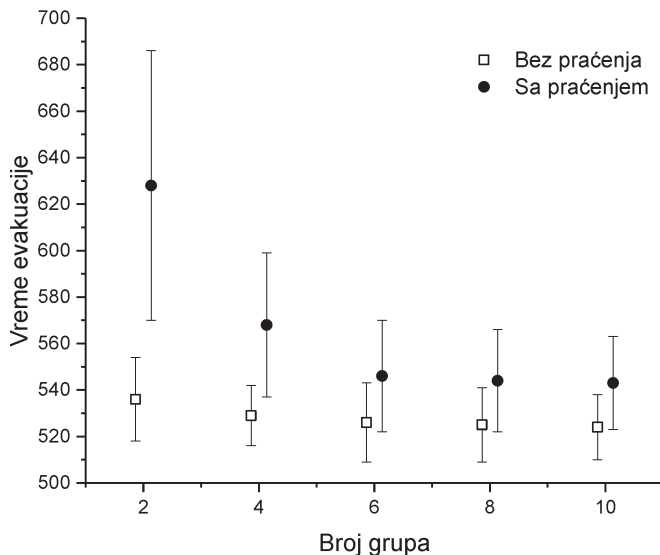
Figure 9. Dependence of the evacuation time on the probability of movement towards the target without following. Vertical bars denote standard deviation. Different shades denote different number of groups.



Slika 10. Zavisnost vremena evakuacije od verovatnoće kretanja ka cilju u slučaju kretanja sa praćenjem. Vertikalnim crtama je označena standardna devijacija.

Figure 10. Dependence of the evacuation time on the probability of movement towards the target with following. Vertical bars denote standard deviation. Different shades denote different number of groups.

Grafici na slikama 9 i 10 prikazuju rezultat simulacije za vreme evakuacije pri različitim verovatnoćama za kretanje ka cilju i različitim brojem grupa. Naznačene su standardne devijacije. Vidi se sličan trend kao na slici 8, samo prikazan za različit broj grupa. Preklapanje dobijenih vrednosti se ne javlja samo za slučajeve simulacije za jednu i dve grupe. Statistički značajna razlika primećuje se samo između vrednosti vremena evakuacije za jednu i dve grupe. Očekivano je da se sa povećanjem broja grupa smanji vreme evakuacije, jer više pešaka zna gde se nalazi izlaz. Dobijene vrednosti za verovatnoću kretanja ka cilju manju od 0.6 imaju veliku grešku i slično grešci na grafiku sa slike 8, simulacija u tim slučajevima ne konvergira u vremenu koje ima fizičkog smisla, te nisu prikazane.



Slika 11. Zavisnost vremena evakuacije od broja grupa u slučaju kada verovatnoća kretanja ka cilju iznosi 1.0. Vertikalnim crtama je označena standardna devijacija.

Figure 11. Dependence of evacuation time on the number of groups. Vertical bars denote standard deviation. White square – without following; black circle – with following.

Grafik na slici 11 prikazuje očekivan trend opadanja srednje vrednosti vremena evakuacije sa povećanjem broja grupa. Verovatnoća kretanja ka cilju je 1, ali ona ne utiče na sam trend, što se može videti sa prethodnih grafika. One pokazuju da razlika između kretanja sa i bez praćenja nije statistički značajna za 6 i više grupa. Poredeći vrednosti vremena evakuacije za različit broj grupa, primećuje se da povećanje broja grupa nema uticaja na vreme evakuacije bez praćenja. Slično se primećuje i da povećanje broja grupa na više od 4 nema značajnog uticaja na vreme evakuacije sa praćenjem.

Zaključak

U radu je korišćenjem ćelijskog automata modelovano kretanje grupisanih pešaka za različite početne uslove. Rezultati simulacija pokazuju da povećanje broja grupa smanjuje vreme potrebno da svi pešaci dođu do cilja. Statistički značajne razlike, odnosno pojava da na grafiku nema preklapanja između opsega dobijenih vrednosti, za vreme evakuacije su dobijene samo između slučajeva kada su pešaci raspoređeni u dve grupe i u jednoj grupi. Ta razlika je veća kada je praćenje prisutno kao aspekt kretanja, što je očekivan rezultat, jer će evakuacija teći brže ukoliko dva pešaka koji su vođe znaju gde se izlaz nalazi, a ne jedan. Interesantno je da u slučaju kada svi pešaci znaju gde se nalazi izlaz, statističke razlike između vremena potrebnog za evakuaciju jedne i dve grupe pešaka ipak postoje. To ukazuje da ukoliko postoji težnja pešaka da budu blizu jedni drugih u toku kretanja, vreme evakuacije će biti manje ako je ta težnja raspoređena na više manjih grupa. U realnom životu ovaj rezultat bi značio da velika grupa prijatelja ukoliko ne želi da se evakuiraju pojedinačno u toku požara u zgradi treba da se raspodeli na više grupa kako bi ubrzali evakuaciju.

Nepostojanje statističkih razlika između vremena evakuacije pešaka za verovatnoće kretanja ka cilju veće od 0.7 ukazuju da agregacija pešaka ne usporava evakuaciju ukoliko su pešaci u već formiranim grupama kompaktne strukture. Ipak, na slici 7 se može videti da je evakuacija sporija ako je struktura grupe nekompaktna na početku simulacije. Primenjeno na realni život značilo bi da u toku evakuacije nije potrebno da pešaci u potpunosti zanemaruju težnju da budu blizu članova svoje grupe, ali je bitno da im se kretanje ne zasniva na udaljavanju od izlaza zarad približavanju članu grupe. Takođe, ako su prisutne dve grupe pešaka nekompaktne strukture, jedan izlaz i samo dvojica vođa koji znaju gde je izlaz, evakuacija će biti brža što je brže ostvarivanje kompaktne strukture grupe, odnosno dolazak do vođe.

Model korišćen u radu uspešno reprodukuje fenomene iz realnog života (Feliciani i Nishinari 2016) i nameće zaključke o nekim novim fenomenima koji se tiču grupisanja pešaka i njihovoj informisanosti gde se izlaz nalazi. Dalja istraživanja u ovoj oblasti mogu ih detaljnije ispitati i potvrditi ili opovrgnuti njihovo postojanje.

Zahvalnost. Zahvaljujemo se svojim mentorima Stevanu Radanoviću i Danielu Silađiju, saradnicima seminara fizike u IS Petnica, na korisnim savetima, podršci i nesebičnoj pomoći prilikom realizacije ovog projekta.

Literatura

- Feliciani C., Nishinari K. 2016. An improved Cellular Automata model to simulate the behavior of high density crowd and validation by experimental data. *Physica A*, **451**: 135.
- Guo R., Huang H. 2008. A modified floor field cellular automata model for pedestrian evacuation simulation. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, **41** (38): 113.
- Qiu F., Hu X. 2010. Modeling group structures in pedestrian crowd simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **18** (2): 190.
- Wolfram S. 1983. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, **55** (3): 600.

Simulation of Pedestrian Group Movement with Leader's Direction

The goal of this paper is the simulation of movement of pedestrians distributed in groups with a leader. The cellular automata model was used in the process. Every group is composed of a certain number of pedestrians, out of which exactly one is the leader. The pedestrian movement is based on aggregation (the movement towards the group center by which the groups maintain the rigid structure) and movement towards the group center. The subtypes of movement towards the given target are movement towards the exit, when the pedestrian knows where the exit is, and following, when the pedestrian moves towards the leader. The pedestrians are given probabilities for both aspects of movement. The possibility of the swap of the pedestrian positions is implemented so that they can bypass each other in case of deadlock.

Several situations were simulated: the pedestrian evacuation for varied numbers of the pedestrian groups, the movement probabilities, group structures and for the cases when the following is present as a movement aspect and when it is not. It was noticed that the phenomena of aggregation and following slow down the evacuation, while increasing the number of groups speeds it up, which is in line with situations from real life. It is concluded that, by varying the probabilities and other parameters, the model can simulate diverse real situations, e.g. when the pedestrians primarily want to be near the members of their own group or to leave the room as soon as possible.

