Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje
in matematiko

MODELIRANJE VODENJA V DINAMIKI JAT

Diplomski seminar na študijskem programu 1. stopnje Fizika

Jure Čačilo

Mentor : doc. dr. Marko Gosak

Maribor, 2020

ČAČILO, J.: Modeliranje vodenja v dinamiki jat
Diplomski seminar, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko, 2020.

POVZETEK
V diplomskem seminarju preučujemo vodenje v modelu dinamike ptičje jate. Kompleksno gibanje, kot je dinamika jat, lahko simuliramo z računalniškim modelom, kjer vsakemu posamezniku v jati določimo tri lokalna območja, s katerimi opišemo osnovno gibanje jate: območje odboja, območje kohezije in območje poravnave. V model dodamo sistem vodenja in preučujemo strukturo jate. V prvem delu preučujemo polarizacijo in elongacijo jate ter verjetnost, da se bo jata razpršila, v odvisnosti od števila vseh posameznikov in deleža informiranih posameznikov. V nadaljevanju model nadgradimo tako, da spreminjamo območje zaznave vsakega posameznika in z enakimi metodami kot prej analiziramo strukturo jate. Ugotovimo, da evolucijski razvoj nekaterih živalskih vrst potekal na način, da jata dosega visoko vrednost polarizacije in elongacije. Prav tako je pomembno, da informirani posamezniki še vedno upoštevajo ostale posameznike v jati.

Ključne besede: dinamika jat, numerična simulacija, vodenje v jati, polarizacija, elongacija, območje zaznave

ABSTRACT
In this seminar we study the effects of leadership in a bird flock model. The dynamics of a flock is a complex system, which can be simulated through a computer model. The model takes into account three regions, that govern the behaviour of every individual in the flock: region of separation, region of alignment and region of cohesion. In the model, we additionally include a leadership system and examine the affects to the structure of the flock. In particular, we investigate how the number of informed individuals affects the polarization and elongation of the flock and probability for flock fragmentation. We further upgrade the model by adding a new region around every individual called the field of perception and analyse the resulting flock structure with the same methods as before. We conclude that the evolutionary development of some animal species took place in such a way that flocks achieve high values of polarization and elongation. It’s also important that informed individuals still consider other individuals in the flock.

Key words: dynamics of a flock, numerical simulation, leadership in a flock, polarization, elongation, field of perception

Vsebina

1 Uvod 1

2 Matematični model 2

2.1 Model vodenja jate 4

3 Analiza dinamike jat 4

4 Rezultati 6

4.1 Polarizacija in elongacija jate 7

4.2 Vpliv uteži informiranih posameznikov 12

4.3 Pomen območja zaznave 14

5 Zaključek 15

1 Uvod

V naravi velikokrat opazimo živalske vrste, ki živijo in potujejo v skupini. Struktura skupin v nekaterih izmed teh živalskih vrst je samo-organizacijska, kot na primer jata rib [1], jata ptic [2], čreda gnujev [3] ali jata ščurkov [4]. Pogosto se beseda jata uporablja kot metafora za vsak samo-organizacijski živalski kolektiv in tako bomo to besedo uporabljali tudi v tem seminarju. Gibanje jate je določeno preko lokalnih socialnih interakcij med posamezniki znotraj skupine. Zaznavanje in komunikacija sta ključna vidika vzdrževanja in strukture (formacije) takšnih skupin. Tako bi naj bil pri jatah rib glavni senzorični sistem vid, pri nekaterih podvrstah pa dodatno še občutljivost na spremembe v vodnem tlaku [5], medtem ko pri jatah ptic prevladujeta zvočna komunikacija in vid [6].

Glavna prednost življenja v skupinah je sposobnost dinamičnega odzivanja na spremembe v okolju, kot so nove migracijske poti, iskanje novih življenjskih virov nujnih za preživetje ter izogibanje plenilcem [7]. Znotraj vsakega takšnega kolektiva obstajajo določeni posamezniki, ki nosijo informacijo o okolju, torej o lokaciji hrane, lokaciji plenilcev ali pa imajo boljše sposobnosti za določanje selitvene poti. Takšni posamezniki vodijo živalsko vrsto in ključno vplivajo na njen obstoj. Tako imenovani »informirani« posamezniki so tipično na čelu jate, kar jim omogoči večjo verjetnost za vnos hrane, vendar po drugi strani predstavlja tudi večjo izpostavljenost plenilcem.

Zaradi kompleksnosti gibanja jate in velikega števila posameznikov v jati modeliramo dinamiko jat z numeričnimi simulacijami. Računalniški modeli, ki jih najdemo v študijah, se osredotočajo predvsem na lokalne interakcije med posamezniki v jati. Takšni minimalistični modeli so računsko zelo učinkoviti pri velikem številu ptic, obenem pa nudijo dober vpogled v realno stanje. Dosedanje študije so se ukvarjale predvsem s strukturo jate pri spreminjanju velikosti lokalnih območji [8], spreminjanju uteži lokalnih območji [9] in širjenju informacij znotraj jate [10]. Modele so nadgrajevali s pravili o izogibanju ovir in plenilcev [11]. Tudi pravila o vodenju v jati so bila že implementirana, kjer so raziskovali, kako vodilni posamezniki prihajajo do soglasnih odločitev [12]. Vendar še vedno ostaja veliko neraziskanega tako o sami strukturi, kot tudi o nadaljnjih nadgradnjah modelov vodenja jate.

Cilj diplomskega seminarja je, da izdelamo računalniški model jate, ki temelji na dosedanjih modelih o lokalnih interakcijah med posamezniki v jati in ga nadgradimo s sistemom informiranih posameznikov, ki jo vodijo. Sistem vodenja temelji na že znanem modelu [12]. Preučimo strukturo jate, natančneje kako se jata obnaša ob različnih vrednostih modelnih parametrov. Preverimo, kako se polarizacija in elongacija spreminjata z deležem informiranih posameznikov. Prav tako preučimo, kako jakost preference gibanja vpliva na verjetnost, da se bo jata razkropila. Nato model nadgradimo in preverimo, kako območje zaznave posameznikov vpliva na polarizacijo in elongacijo jate. Kljub temu, da so parametri za računalniški model vzeti za jato ptic [12], rezultate lahko posplošimo in so uporabni za vsak samo-organizacijski živalski kolektiv.

Struktura diplomskega seminarja je sledeča. V drugem poglavju naprej predstavimo osnovni matematični model gibanja jate, ki ga v nadaljevanju nadgradimo s sistemom informiranih posameznikov, ki vodijo jato. V tretjem poglavju postopoma definiramo, na kakšne načine jato

analiziramo in predstavimo formalizem za izdelavo numerične simulacije. V četrtem poglavju predstavimo rezultate in jih primerjamo z rezultati drugih študij. V zaključnem delu seminarja povzamemo naše ugotovitve in navedemo možnosti nadaljnjega dela.

2 Matematični model

Za osnovni opis dinamike jat je pomembno, da definiramo lokalne interakcije med posamezniki, ki so znotraj določenih omejenih območij, kot je shematsko ponazorjeno na sliki 1. V teoretičnem modelu določimo tri takšna območja: območje odboja, območje poravnave in območje kohezije, preko katerih lahko napovedujemo kompleksno gibanje jate.

Podrobnejši matematični formalizem za opis dinamike jat lahko bralec najde v [9, 12], tukaj ga bomo zgolj na kratko povzeli. Privzemimo, da je kolektiv sestavljen iz N posameznikov, katerih položaj je definiran s krajevnim vektorjem $\vec{r}_i(t) \in \mathbb{R}^3$, hitrost pa z vektorjem $\vec{v}_i(t) \in \mathbb{R}^3$. Posamezniki se gibljejo s konstantno hitrostjo v_0 in imajo omejen kot zasuka θ. V vsakem časovnem koraku Δt se posameznikom sočasno določi nova smer hitrosti glede na lego ostalih posameznikov v odvisnosti od tega, v katerem območju je posameznik.

Območje odboja je tisto območje, v katerem posameznik ne želi imeti drugega posameznika. S tem je zagotovljeno, da tekom gibanja jate ne pride do trkov. To območje je manjše od območij kohezije in poravnave in ga označimo z α (glej sliko 1a). Za vsakega posameznika s trenutnim vektorjem lege $\vec{r}_i(t)$ velja enačba:

$$\vec{d}_i(t + \Delta t) = -\sum_{j \neq i}^{N} \frac{\vec{r}_j(t) - \vec{r}_i(t)}{|\vec{r}_j(t) - \vec{r}_i(t)|} \quad , \tag{1}$$

kjer $\vec{d}_i(t + \Delta t)$ predstavlja željeno smer gibanja ob nekem kasnejšem času $t + \Delta t$, i predstavlja indeks trenutnega posameznika, j pa je indeks, ki teče od trenutnega posameznika (izključen), pa do vseh ostalih.

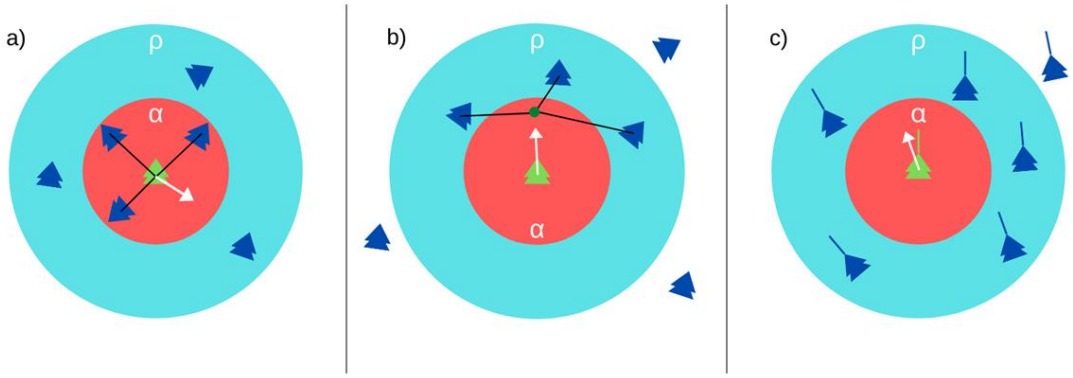
Kadar posameznik i nima nobenega drugega posameznika znotraj območja odboja, začuti privlak do ostalih posameznikov, ki so znotraj območja kohezije ρ (glej sliko 1b). S tem zagotovimo, da se posamezniki ne bodo gibali razpršeno po prostoru, temveč bodo ustvarili kolektiv. Znotraj območja kohezije bodo posamezniki želeli zmanjšati razdaljo med seboj in ostalimi posamezniki, kar opišemo z naslednjo zvezo:

$$\vec{d}_i(t + \Delta t) = \sum_{j \neq i}^{N} \frac{\vec{r}_j(t) - \vec{r}_i(t)}{|\vec{r}_j(t) - \vec{r}_i(t)|} \quad . \tag{2}$$

Kadar posameznik i nima nobenega drugega posameznika znotraj območja odboja, pa nanj ne deluje samo privlak ostalih posameznikov, temveč se z ostalimi želi tudi poravnati. Svojo smer hitrosti želi poravnati s smerjo hitrosti ostalih posameznikov znotraj območja, kar opišemo z enačbo:

$$\vec{d}_i(t+\Delta t) = \sum_{j=1}^{N} \frac{\vec{v}_j(t)}{|\vec{v}_j(t)|} \quad , \tag{3}$$

kjer indeks j teče po vseh posameznikih v območju poravnave ρ, vključno z opazovanim posameznikom. Območje kohezije je hkrati tudi območje poravnave.



Slika 1. Shema modela gibanja jate. Izbrani posamezniki so zelene barve, ostali pripadniki jate so modri. Bela puščica prikazuje željeno smer gibanja, α označuje območje odboja, ρ pa območje kohezije in poravnave. a) Pravilo odboja. Željena smer trenutnega posameznika se izračuna glede na lege ostalih posameznikov samo znotraj območja α in kaže v nasprotno smer, kot je masno središče vseh posameznikov znotraj območja odboja. b) Pravilo kohezije. Če trenutni posameznik nima nobenega drugega posameznika v območju odboja, a jih ima v območju kohezije, kaže njegova željena smer gibanja proti masnemu središču vseh posameznikov znotraj območja kohezije (zelena točka). c) Pravilo poravnave. Če trenutni posameznik nima nobenega drugega posameznika znotraj območja odboja, a jih ima v območju poravnave, je njegova željena smer gibanja enaka povprečni smeri hitrosti vseh posameznikov znotraj območja poravnave. Povzeto po [13].

Pomembno je, da še enkrat izpostavimo, da ima območje odboja največjo prioriteto, čeprav je najmanjše. To pomeni, da bomo (enačbi (2) in (3)) upoštevali samo v primeru, če trenutni posameznik ne bo imel nobenega posameznika v območju oboja. Takrat bo veljalo, da je njegova željena smer enaka seštevku željenih smeri zaradi kohezije in poravnave:

$$\vec{d}_i(t+\Delta t) = \sum_{j\neq i}^{N} \frac{\vec{r}_j(t) - \vec{r}_i(t)}{|\vec{r}_j(t) - \vec{r}_i(t)|} + \sum_{j=1}^{N} \frac{\vec{v}_j(t)}{|\vec{v}_j(t)|} \quad . \tag{4}$$

Ker se posamezniki lahko zasučejo za največ $\theta\Delta t$ v enem časovnem koraku, moramo v vsakem koraku pogledati kot med trenutno hitrostjo $\vec{v}_i(t)$ in smerjo željene hitrosti $\vec{d}_i(t+\Delta t)$. Kadar je njun medsebojni kot večji kot θ, potem posameznikova nova hitrost ni enaka željeni smeri hitrosti, ki je podana s smerjo $\vec{d}_i(t+\Delta t)$, temveč se zasuče za θ proti njej. Na koncu je vsakemu posamezniku sočasno določena nova lega:

$$\vec{r}_i(t+\Delta t) = \vec{r}_i(t) + v_0 \hat{d}_i(t+\Delta t)\Delta t \quad , \tag{5}$$

kjer je v_0 vrednost hitrosti za vsakega posameznika in je konstantna.

2.1 Model vodenja jate

Osnovni model gibanja jate nadgradimo z vodenjem znotraj jate. Delež populacije p dobi informacijo o preferenčni smeri (izraženo z enotskim vektorjem $\vec{g}$), ki na primer v naravi predstavlja znano pot do vira hrane. Vsi drugi posamezniki nimajo nikakršne želje gibanja v točno določeno smer in tudi ne vedo, kateri posamezniki nosijo informacijo o preferenčni smeri in kateri ne. Informirani posamezniki uravnovešajo preferenčno smer z željeno smerjo gibanja, zaradi lokalnih območji ($\vec{d}$), preko uteži ω. Željeno smer informiranih posameznikov ($\hat{u}$) izračunamo po enačbi:

$$\hat{u}_i(t + \Delta t) = \frac{\hat{d}_i(t + \Delta t) + \omega\vec{g}}{|\hat{d}_i(t + \Delta t) + \omega\vec{g}|} \quad , \tag{6}$$

kjer je $\hat{d}_i(t + \Delta t)$ predstavlja enotski vektor v smeri $\vec{d}_i$ (enačba (4)):

$$\hat{d}_i(t + \Delta t) = \frac{\vec{d}_i(t + \Delta t)}{\left|\vec{d}_i(t + \Delta t)\right|} \quad . \tag{7}$$

Če je utež ω enaka nič, potem osebki nimajo želje gibanja v točno določeno smer. Ko se ω približuje vrednosti ena, se gibanje posameznika v smeri enotskega vektorja $\vec{g}$ uravnoveša z željo po ohranjanju lokalnih interakcij znotraj jate. Ko utež ω prekorači vrednost 1, je vpliv zaradi preferenčne smeri veliko večji, kot je vpliv zaradi sosedskih posameznikov in smer informiranega posameznika se vedno bolj približuje preferenčni smeri (enotskemu vektorju $\vec{g}$), ne glede na gibanje ostalih posameznikov v jati.

3 Analiza dinamike jat

Strukturo jate bomo preučevali z izračunom njene polarizacije (P) in elongacije (E). Slika 2 prikazuje, kako določimo elongacijo jate. Najprej ustvarimo minimalno mejno škatlo, ki vsebuje vse posameznike jate in izračunamo razmerje med osjo mejne škatle, ki je poravnana z smerjo gibanja jate (l), in osjo pravokotno na smer gibanja jate (h) oziroma (w). Elongacijo izračunamo po naslednji enačbi:

$$E(t) = \frac{l(t)}{\max\left(h(t), w(t)\right)} \quad . \tag{8}$$

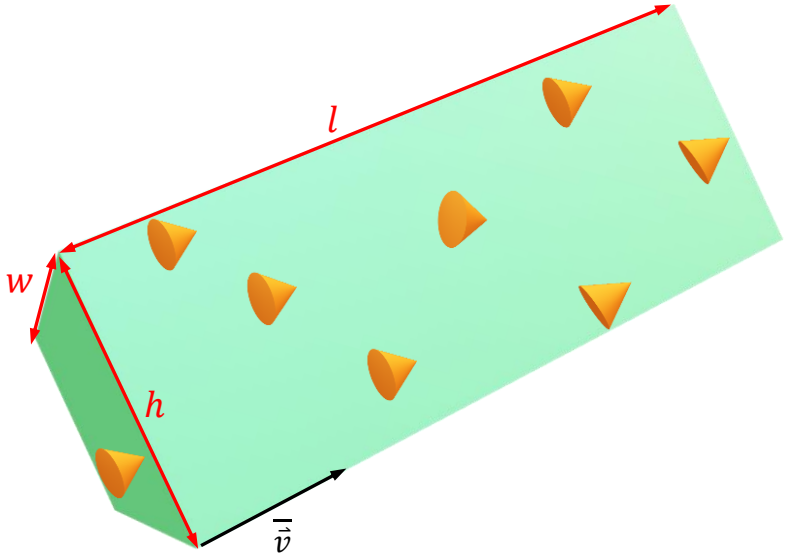
Kljub temu, da je elongacija jate odvisna od časa, se bomo pri analizi strukture jate osredotočali na končen položaj jate po t_f korakih. Kadar je jata enako široka kot dolga, je $E(t) = 1$, kadar je jata daljša, torej so posamezniki bolj razpršeni v smeri gibanja kot pravokotno na njo, potem je $E(t) > 1$, kadar pa je jata bolj široka kot dolga, pa je $E(t) < 1$.

Polarizacija (P) meri stopnjo poravnanosti gibanja jate. Shema na sliki 3 prikazuje, kako jo izračunamo. Naprej definiramo vektor $\vec{s}$, ki kaže v smeri od masnega središča jate izračunanega ob času $(t_f - m)\Delta t$ do masnega središča jate izračunanega ob času $t_f\Delta t$, kjer je t_f število vseh

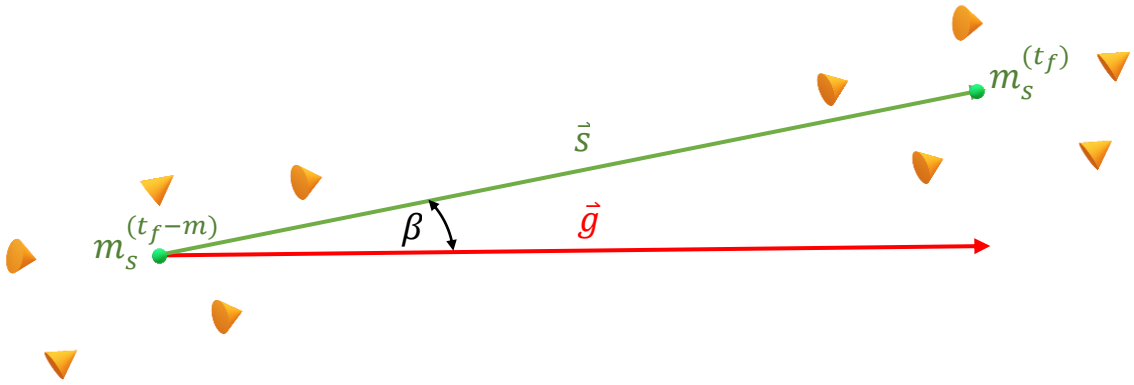
korakov, m pa pove koliko korakov pred končnim številom korakov želimo izračunati prvo masno središče. Nato izračunamo kot med vektorjem $\vec{s}$ in preferenčno smerjo $\vec{g}$. Polarizacijo izračunamo po naslednji enačbi:

$$P(\beta) = \begin{cases} \cos\beta, & 0° \leq \beta \leq 90° \cup 270° \leq \beta \leq 360° \\ 0, & 90° < \beta < 270° \end{cases} . \quad (9)$$

Vrednosti, ki jih dobimo se gibljejo med $P(t) \in [0,1]$, pri čemer $P(t) = 1$ pomeni, da se vsi posamezniki v jati gibljejo v preferenčno smer, $P(t) = 0$ pa pomeni, da imamo naključno gibanje posameznikov v jati. Enak način vrednotenja polarizacije in elongacije je bil uporabljen v [9,12].

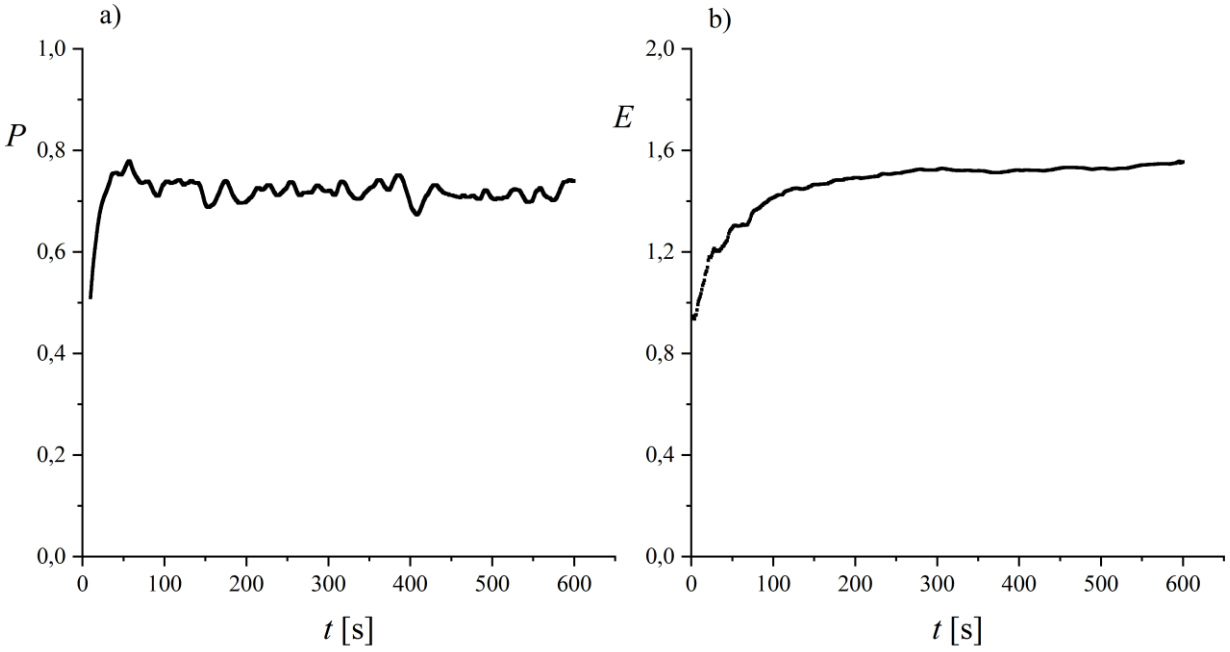


Slika 2. Elongacija jate. Vse posameznike v jati zaobjamemo z minimalno mejno škatlo. Postavitev škatle določimo tako, da izračunamo povprečno smer hitrosti jate ($\vec{v}$) in postavimo nosilko stranice škatle z dolžino l tako, da kaže v smeri povprečne hitrosti jate. Dolžini pravokotnih stranic označimo z w in h. Elongacija jate (E) je enaka razmerju med dolžino (l), in daljšo od ostalih dveh stranic (w, h).



Slika 3. Polarizacija jate. Naprej izračunamo lego masnega središča (m_s) jate po končnem številu korakov ($m_s^{(t_f)}$). Nato izračunamo lego masnega središča m korakov prej ($m_s^{(t_f-m)}$). Določimo vektor $\vec{s}$, ki kaže od masnega središča izračunanega m korakov pred končnim številom korakov, pa do masnega središča izračunanega po končnem številu korakov. Kot β je kot med vektorjem $\vec{s}$ in preferenčno smerjo ($\vec{g}$). Polarizacijo izračunamo po (enačba (9)).

Da dobimo statistiko strukture jate glede na neko množico parametrov, smo opravili 50 neodvisnih simulacij do stacionarnega stanja, vsakič z različnimi začetnimi pogoji. Na začetku vsake simulacije so bili posamezniki postavljeni v omejeno območje z naključnim vektorjem lege in hitrosti. Korak v simulaciji je predstavljal $\Delta t = 0{,}2$ s v realnem okolju. Simulacije so bile opravljene za 3000 korakov, tako da je bilo zagotovljeno, da je jata prišla do stacionarnega gibanja. Za vsako doseženo stacionarno stanje smo beležili povprečno polarizacijo in elongacijo, prav tako pa verjetnost fragmentarnosti jate pri stacionarnem stanju. Pri izračunu polarizacije smo za m uporabili vrednost 50. Iz slike 4 je razvidno, da je končno stanje bilo doseženo po manj kot 500 korakih (100 s).



Slika 4. Polarizacija (P) in elongacija (E) v odvisnosti od časa (t) v testni simulaciji. Po 200 s se približamo konstantnim vrednostim. $N = 50$, $\omega = 0{,}5$, $p = 0{,}1$.

Za jato velja, da se je razkropila, če je sestavljena iz dveh ali več podskupin (podjat), ki med seboj ne interagirajo. Kvalitativno smo fragmentarnost določili tako, da smo izračunali razdaljo med vsakim posameznikom v jati in če je bila maksimalna izračunana razdalja večja, kot je trikratno območje kohezije, smo privzeli, da se je jata razkropila. Za preferenčno smer informiranih posameznikov smo izbrali $\vec{g} = (1{,}0{,}0)$, vendar katerakoli druga izbira vektorja ne bi kvalitativno vplivala na rezultate.

4 Rezultati

Računalniški model je bil izdelan v programskem jeziku Python. Grafi, ki sledijo, so večinoma bili narejeni s Pythonovo knjižnico Matplotlib. Gibanje jate ob različnih časih je prikazano na slikah 5 in 6. Smiselno dobljeni posnetki strukture in gibanja jate so predstavljali velik korak v diplomski nalogi in so bili ključnega pomena za nadaljnje analize. Pravilnost implementacije matematičnega modela v računalniško kodo smo preverili na sledeč način. Naprej smo uporabili Pythonovo knjižnico p5, ki je namenjena dvodimenzionalni univerzalni simulaciji jate v realnem času. Preverili smo pravilnost delovanja vsakega območja posebej, naprej na manjšem

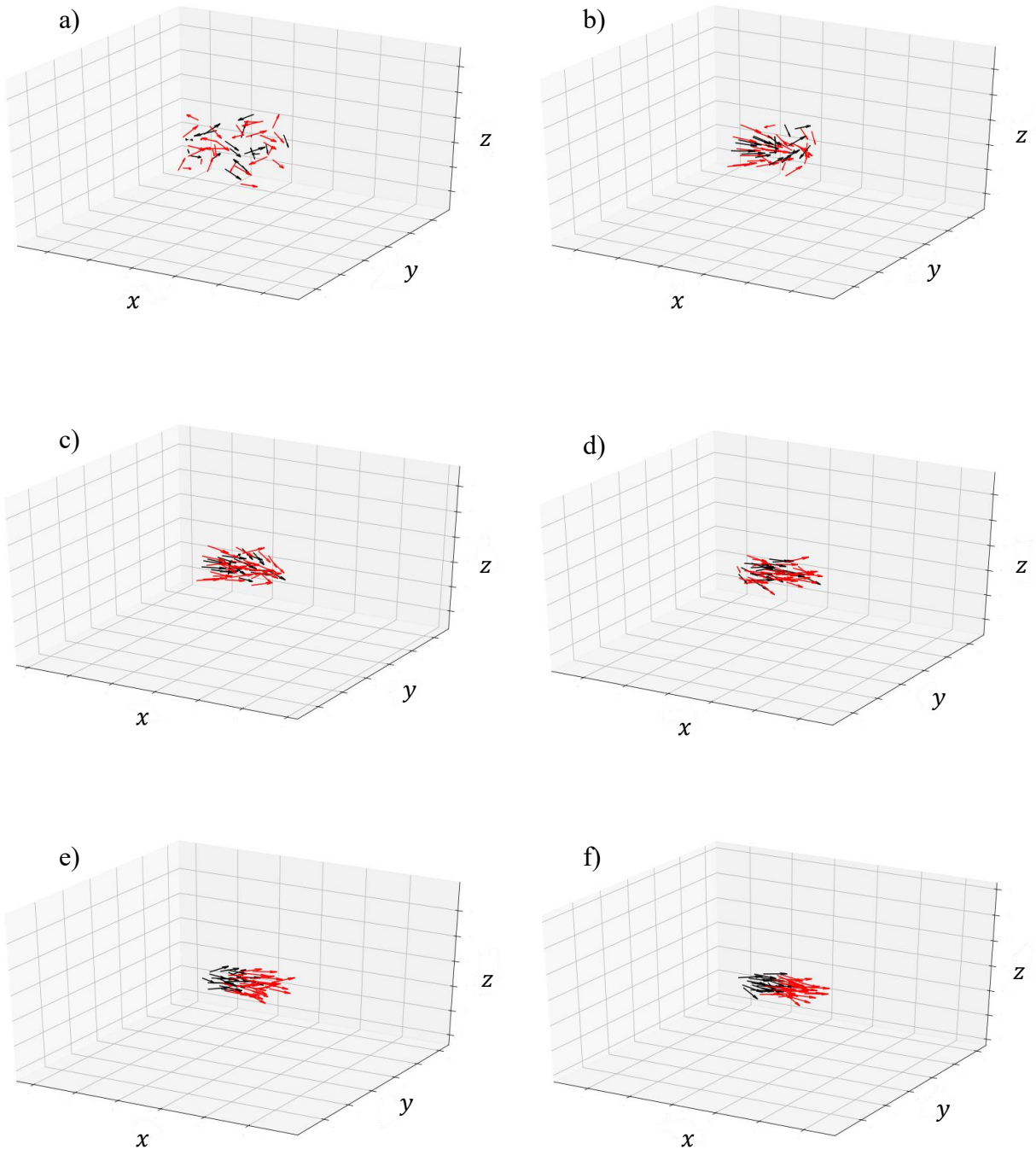
številu posameznikov in šele nato na velikem. Nato smo združili vsa tri pravila, dodali sistem vodenja in simulirali končno gibanje jate. Zaradi prevelike računske zahtevnosti smo smiselno gibanje jate v trodimenzionalnem univerzalnem prostoru preverili tako, da smo zajemali položaje jate ob različnih trenutkih in združili sličice v animacijo. Na sliki 5 lahko vidimo primere sličic iz animacije. S časom se informirani posamezniki postavijo na čelo jate. Iz vseh simulacij in animacij je razvidno, da jata deluje kot kolektiv, se torej ne razprši po celotnem prostoru, in ohranja minimalno razdaljo med posamezniki. Takšno obnašanje je v skladu z obnašanjem podobnih modelov v literaturi [9,12], kar je bila za nas dodatna potrditev pravilnosti implementacije modela.

V nadaljevanju preverimo, kako se struktura jate spreminja ob spreminjanju deleža informiranih posameznikov (slika 6). Kot že prej omenjeno, kaže preferenčna smer informiranih posameznikov $\vec{g}$ v smeri pozitivne abscisne osi x. Če povečujemo delež informiranih posameznikov, vidimo, da je smer gibanja jate ($\vec{s}$) vedno bolj poravnana s preferenčno smerjo ($\vec{g}$), medtem ko se zdi, da je jata bolj elongirana v smeri gibanja pri srednjem deležu informiranih posameznikov. Podrobnejša analiza sledi v naslednjem poglavju.

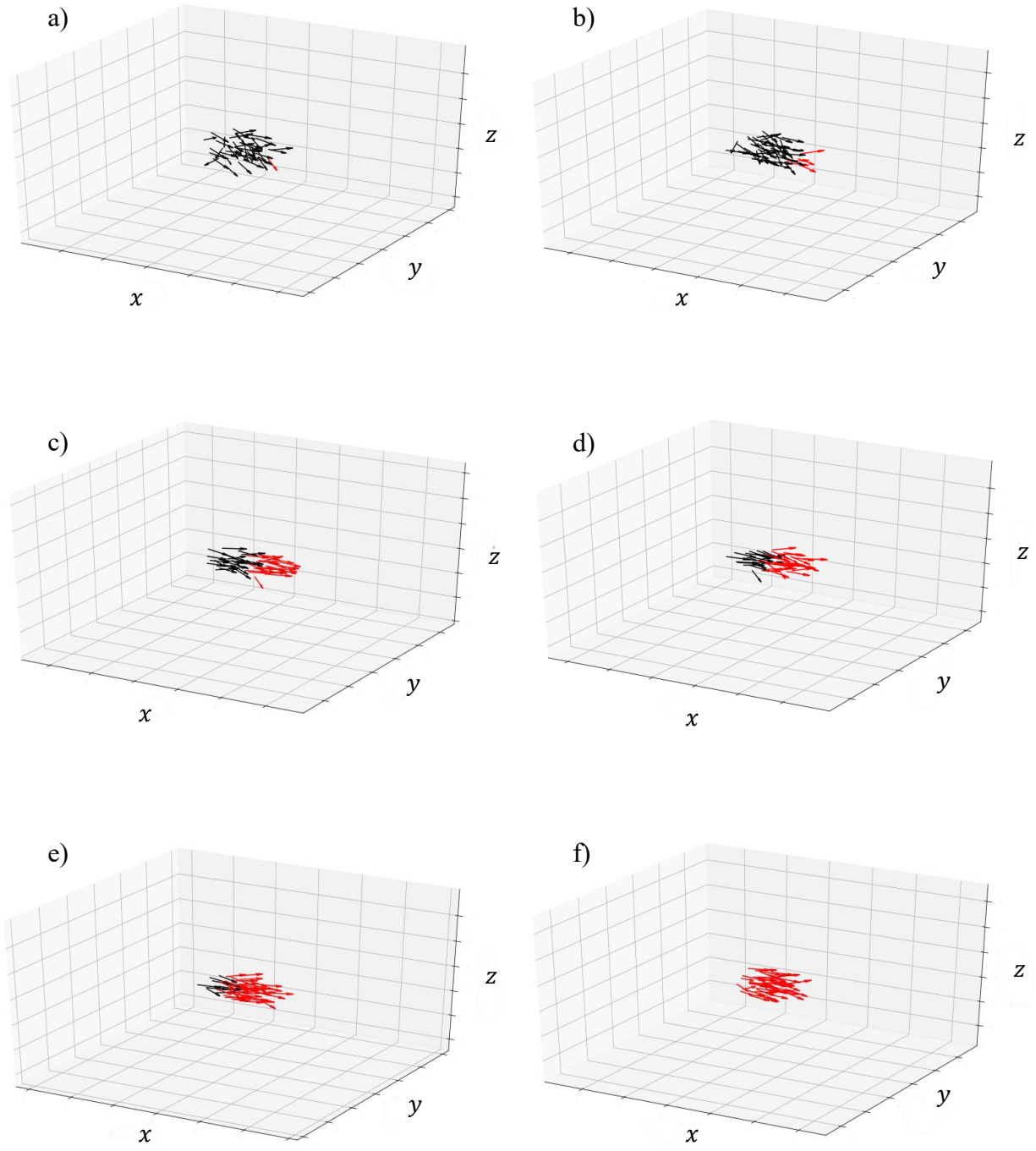
4.1 Polarizacija in elongacija jate

Kot smo že omenili v poglavju 3, bomo strukturo jate ovrednotili na podlagi polarizacije in elongacije. Vrednosti parametrov: $\alpha = 1, \rho = 6, v_0 = 1$, smo vzeli iz vira [12]. Na sliki 7 lahko vidimo, kako se polarizacija jate spreminja v odvisnosti od števila informiranih posameznikov p. Opazimo, da se polarizacija jate glede na preferenčno smer informiranih posameznikov asimptotično približuje vrednosti ena, ko večamo število informiranih posameznikov. Kadar imamo večje število posameznikov v jati, postane razmerje med polarizacijo in deležem informiranih posameznikov vedno bolj nelinearno. Večja kot je jata, manjši delež posameznikov je potreben za uspešno vodenje jate. Zaradi tega je za dovolj velike jate potreben zelo majhen delež informiranih posameznikov, da jata doseže visoko vrednost polarizacije. Ti rezultati so v skladu z ugotovitvami Couzin et al. [14].

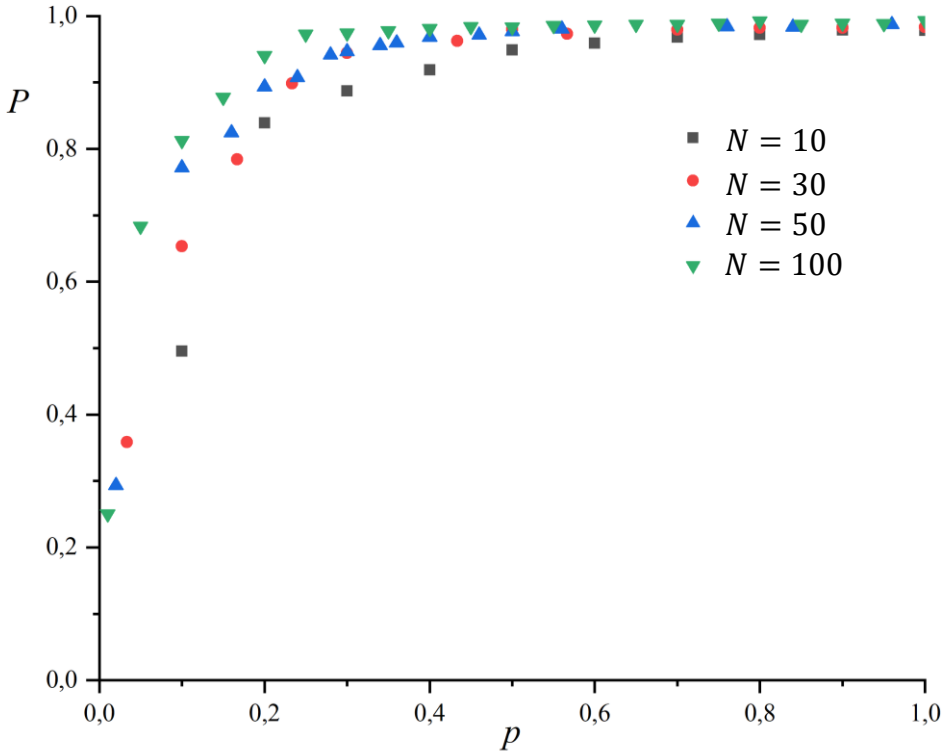
Za boljši vpogled v zvezo med strukturo in polarizacijo jate izrišimo še graf elongacije jate v odvisnosti od števila informiranih posameznikov p . Iz grafa na sliki 6 je razvidno, da je začetni porast polarizacije jate povezan s tem, da jata postaja vedno bolj enakomerno razporejena v preferenčni smeri, vendar le do določenega deleža informiranih posameznikov. Pri velikih relativnih deležih informiranih posameznikov le-ti ne dosegajo več tako izrazite čelne pozicije, kar je kvalitativno razvidno tudi iz slike 8. Jata ni več tako elongirana v smeri gibanja, temveč se povečuje tudi razdalja med posamezniki pravokotno na njo (enačba (8)). To je razvidno tudi s histogramov na sliki 9, kjer smo izračunali razdaljo med vsakim posameznikom v jati, $c_{i,j} = |r_i - r_j|$ in vsako razdaljo umestili v enega izmed 25 intervalov na abscisni osi. Nato smo izračunali število ponovitev (N_i) razdalj v določenem intervalu. Vsako vrednost smo normalizirali glede na število vseh razdalj v jati (N_0), ki je bilo enaka $N_0 = N(N-1)/2$.



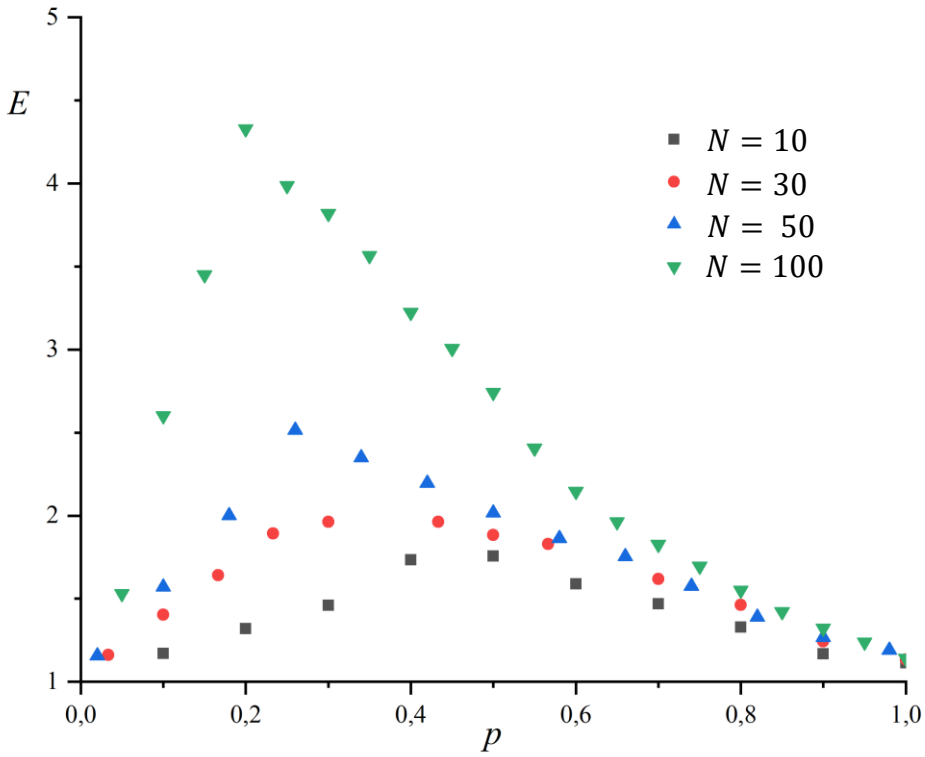
Slika 5. Posnetki strukture in gibanja jate zajetih ob časih, a) 0 s, b) 1,4 s, c) 2,8 s, d) 10 s, e) 40 s, f) 500 s. $N = 50, p$ =0,5, ω =0,5, $\vec{g} = (1,0,0)$. Rdeče puščice označujejo informirane posameznike.



Slika 6. Posnetki strukture jate po 600 časovnih enotah za različne deleže informiranih posameznikov: a) $p = 0{,}02$ (1 informiran posameznik), b) $p = 0{,}1$ (5 informiranih posameznikov), c) $p = 0{,}4$ (20 informiranih posameznikov), d) $p = 0{,}6$ (30 informiranih posameznikov), e) $p = 0{,}8$ (40 informiranih posameznikov), f) $p = 1{,}0$ (50 informiranih posameznikov). $N = 50, \omega = 0{,}5$. Rdeče puščice označujejo informirane posameznike.



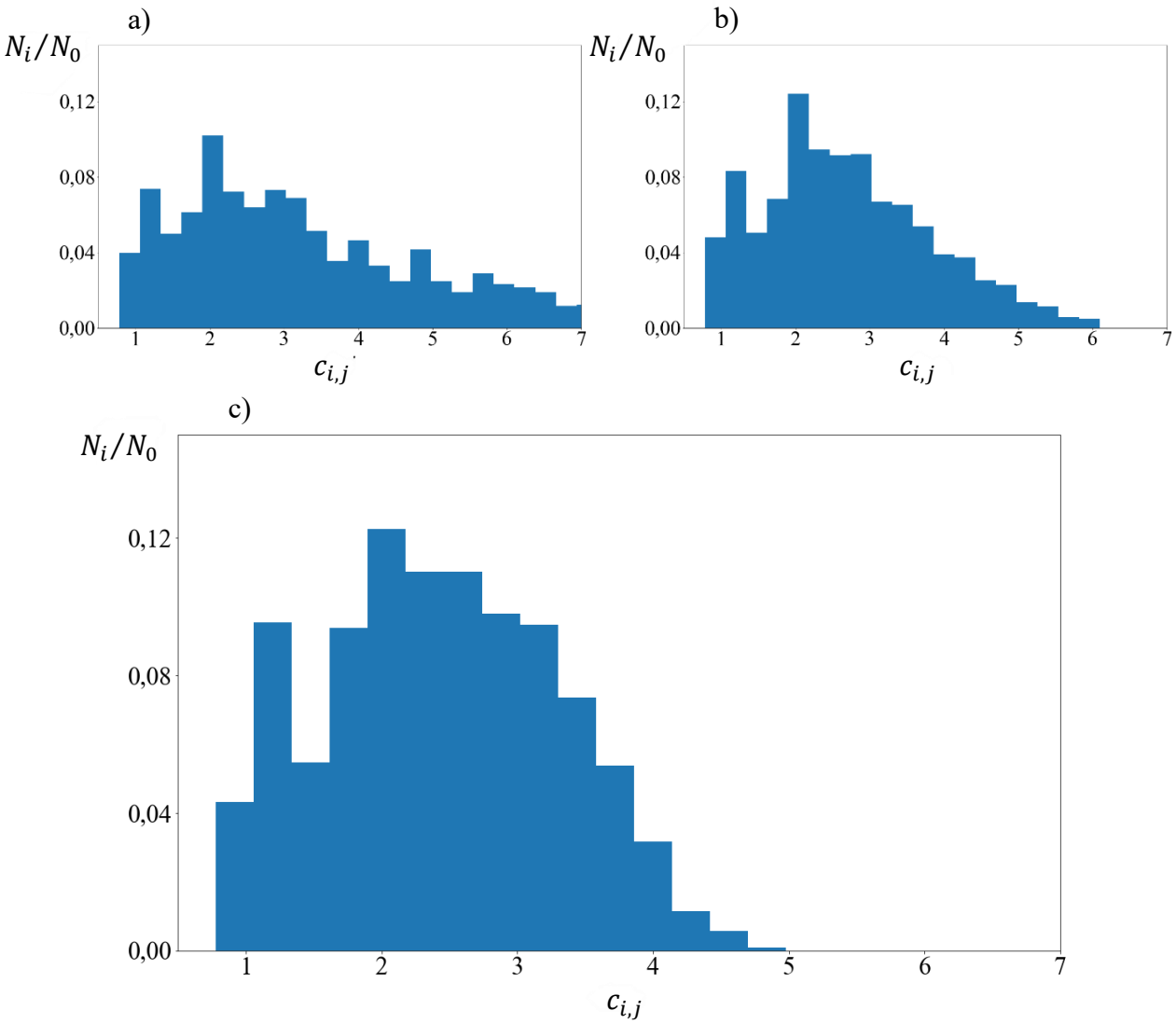
Slika 7: Polarizacija (P) jate v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov (p), pri različnih velikostih (N) jate. $\omega = 0{,}5$, $\alpha = 1$, $\rho = 6$, $\Delta t = 0{,}2$, $v_0 = 1$.



Slika 8. Elongacija (E) jate v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov (p), pri različnih velikostih (N) jate. $\omega = 0{,}5$, $\alpha = 1$, $\rho = 6$, $\Delta t = 0{,}2$, $v_0 = 1$.

Z večanjem števila informiranih posameznikov se vrh histograma pomika v desno, proti večjim oddaljenostim. To pomeni, da se povprečne razdalje med posamezniki povečujejo in to predvsem v smeri pravokotno na smer gibanja jate. Zato imamo manjše vrednosti elongacije pri velikem številu informiranih posameznikov.

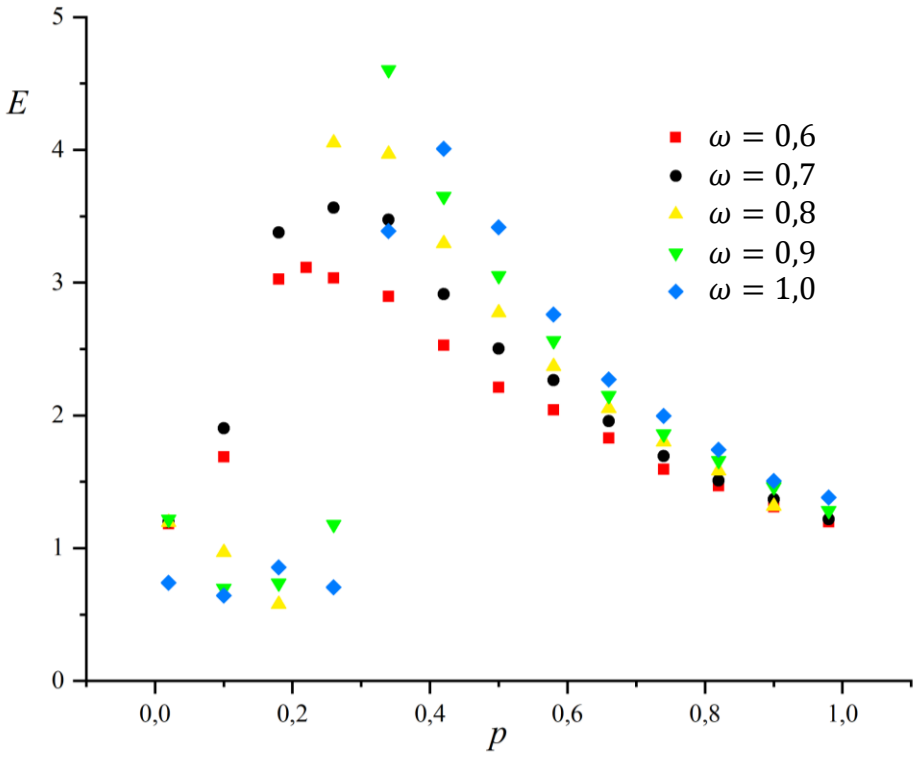
Te rezultate lahko razumemo v kontekstu evolucijskega razvoja živalskih kolektivov, v katerih velja samo-organizacijska struktura, saj je razvoj potekal tako, da so živalske vrste efektivno dosegle asimptoto polarizacije. Sklepamo lahko, da z večanjem števila informiranih posameznikov živalska vrsta ne bi bila tako evolucijsko uspešna.



Slika 9. Histogrami razdalj med posamezniki ($c_{i,j}$) pri različnih deležih informiranih posameznikov in konstantni velikosti jate (N). Razdaljo med vsakim posameznikom v jati smo umestili v enega izmed 25 intervalov na abscisni osi. Ordinatna os predstavlja razmerje med številom ponovitev vseh razdalj znotraj izbranega intervala (N_i) in številom vseh razdalj med posamezniki (N_0). a) $p = 0{,}2$ (10 informiranih posameznikov); b) $p = 0{,}6$ (30 informiranih posameznikov); c) $p = 1{,}0$ (50 informiranih posameznikov). Večji, kot je delež informiranih posameznikov (p), večja je povprečna razdalja med dvema posameznikoma (vrh histograma). $N = 50$, $\omega = 0{,}5$, $\alpha = 1$, $\rho = 6$, $\Delta t = 0{,}2$, $v_0 = 1$.

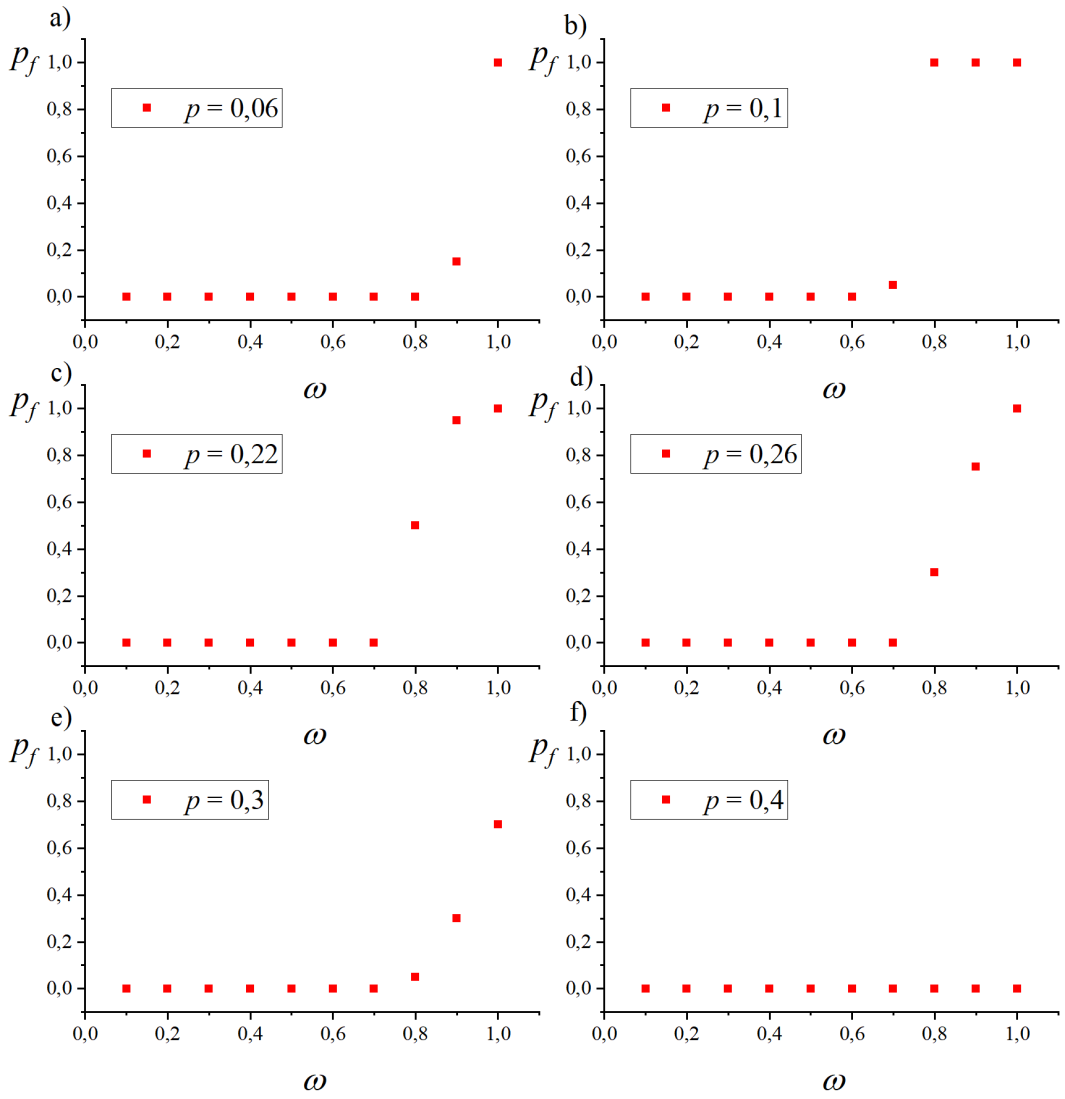
4.2 Vpliv uteži informiranih posameznikov

V nadaljevanju bomo preučili, kako na strukturo in delovanje jate vpliva utež preferenčne smeri ω. Na sliki 10 je prikazano, kako se elongacija spreminja v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov p za različne vrednosti preferenčne uteži ω. Velikost jate je konstantna. Opazimo, da se maksimalna vrednost elongacije povečuje in premika proti večjemu deležu informiranih posameznikov, ko se utež povečuje. Ko je $\omega \geq 0{,}8$ in delež informiranih posameznikov majhen (od 0,1 do 0,2), pa vidimo, da se vrednosti elongacije gibljejo okoli 1, kljub temu, da bi pričakovali veliko višje vrednosti ($E \cong 1{,}5$). Ker z večanjem preferenčne uteži informirani posamezniki vedno manj upoštevajo lokalne interakcije z ostalimi posamezniki (enačba (6)), se v preferenčni smeri povečuje povprečna razdalja med posamezniki in tako se poveča tudi možnost, da se bo jata razdrobila v podjate.



Slika 10. Elongacija (E) jate v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov (p), za različne vrednosti uteži preferenčne smeri ω. Z večanjem uteži se maksimalna vrednost elongacije povečuje in premika proti večjemu deležu informiranih posameznikov. $N = 50$, $\alpha = 1$, $\rho = 6$, $\Delta t = 0{,}2$, $v_0 = 1$.

Na sliki 11 je prikazana verjetnost p_f, da bo jata razpadla in sicer v odvisnosti od uteži preferenčne smeri ω, za različne deleže informiranih posameznikov, pri konstantni velikosti jate. Iz prikazov je razvidno, da utež preferenčne smeri nima velikega vpliva na razkropljenost jate, kadar je delež informiranih posameznikov velik (slika 11f). Pri vmesnih vrednostih pa je vrednost uteži ω zelo korelirana z verjetnostjo, da se bo jata razkropila.

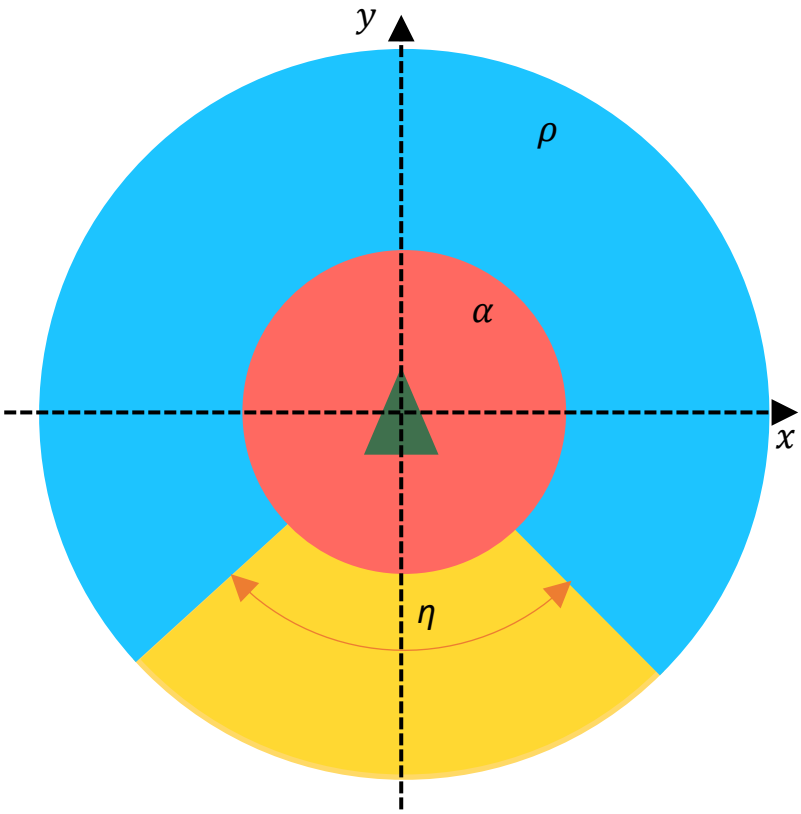


Slika 11. Verjetnost (p_f), da se bo jata razdrobila, v odvisnosti od uteži ω preferenčne smeri pri različnih deležih informiranih posameznikov (p). a) $p = 0{,}06$ (3 informirani posamezniki); b) $p = 0{,}1$ (5 informiranih posameznikov); c) $p = 0{,}22$ (11 informiranih posameznikov); d) $p = 0{,}26$ (13 informiranih posameznikov); e) $p = 0{,}3$ (15 informiranih posameznikov); f) $p = 0{,}4$ (20 informiranih posameznikov). $N = 50$, $\alpha = 1$, $\rho = 6$, $\Delta t = 0{,}2$, $v_0 = 1$.

Zavedati se je treba, da ima povečanje vrednosti ω pri vmesnih deležih informiranih posameznikov p svojo ceno. Iz slik 10 in 11 je razvidno, da obstaja kompromis med elongacijo jate in verjetnostjo, da se bo jata razdrobila. Primanjkovanje kohezije v skupini bi lahko bilo kritično pri živalskih vrstah, kot so čebele [15] ali jatne ribe [16]. Prav tako obstajajo eksperimentalni dokazi, da se takšni kompromisi dogajajo tudi v drugih živalskih vrstah, kjer je učenje o novih migracijskih poteh odvisno od sposobnosti informiranih posameznikov ohranjati lokalne interakcije z neinformiranimi (naivnimi) posamezniki [17].

4.3 Pomen območja zaznave

Do sedaj smo obravnavali interakcije med posamezniki v jati tako, da sta bili območji kohezije in poravnave okoli posameznika krogli. Vendar v realnosti posameznik v jati ne more zaznati vseh posameznikov okoli sebe, ampak le tiste, ki so v njegovem vidnem polju. Temu območju, ki je shematsko ponazorjeno na sliki 12, pravimo območje zaznave. Kot, znotraj katerega posameznik ne more zaznati ostalih pripadnikov jate, označimo z η.



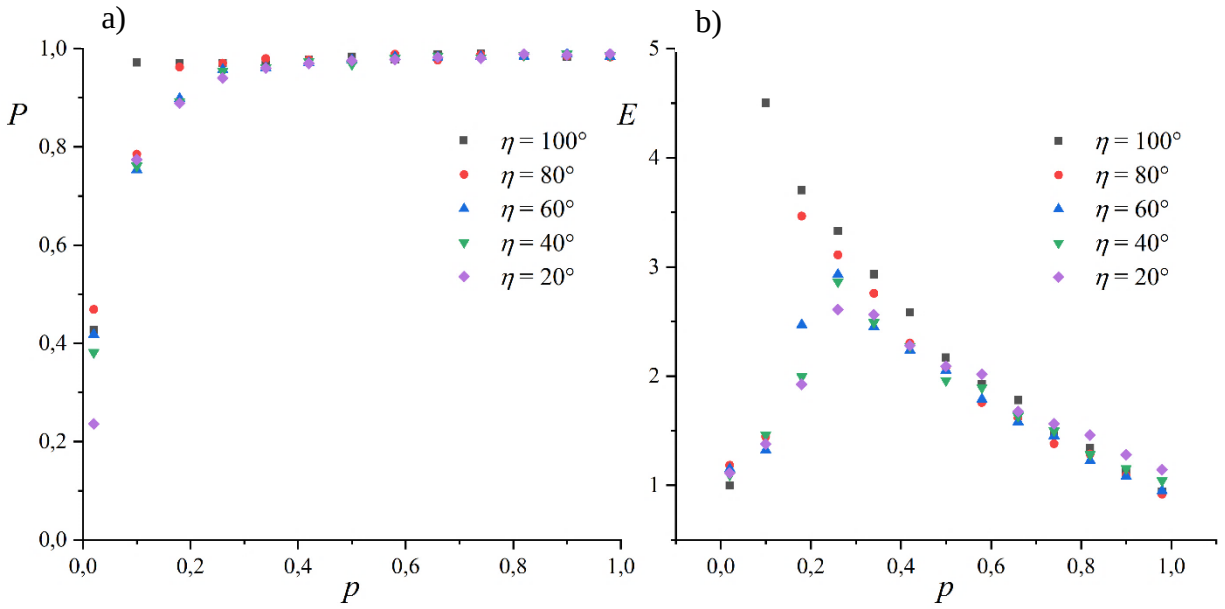
Slika 12. Shema območja odboja α (rdeče barva), kohezije in poravnave ρ (modro barva) okoli trenutnega posameznika v izhodišču koordinatnega sistema. Za posameznikom lahko vidimo slepo območje (rumena barva), v katerem ne zazna ostalih posameznikov. Kot η določa to območje. Območje zaznave je enako $360° - \eta$. Povzeto po [8].

Slika 13a prikazuje zvezo med polarizacijo jate in deležem informiranih posameznikov p pri različnih območjih zaznave $360° - \eta$. Z manjšanjem območja zaznave se nekolinearnost med polarizacijo in deležem informiranih posameznikov stopnjuje. Pri manjših območjih zaznave, kot je npr. $260°$, je vrednost polarizacije enaka $0{,}95$ že pri samo $0{,}1\%$ deležu informiranih posameznikov.

Če pogledamo še sliko 13b, kjer je prikazana elongacija jate v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov p pri različnih območjih zaznave, lahko vidimo podoben trend, kot na sliki 11, kjer smo spreminjali preferenčno utež ω. Razlika je edino v tem, da se nam sedaj maksimalna vrednost elongacije pomika proti manjšim vrednostim informiranih posameznikov, ko

manjšamo območje zaznave oziroma povečujemo slepo območje za posameznikom. Prav tako je razlika v tem, da pri manjših deležih informiranih posameznikov ne prihaja do drobljenja jate.

Razlog, da se vrednosti elongacije in polarizacije tako povečujeta, ko zmanjšujemo območje zaznave, je v tem, da z zmanjšanjem območja zaznave zmanjšujemo tudi število posameznikov, ki jih bo vsak ostali imel v svojih lokalnih območjih. Posamezniki, ki bodo pred drugimi, bodo imeli veliko večjo verjetnost, da bodo v območju kohezije in poravnave, kot tisti, ki bodo za njim. Ker pa vemo, da se informirani posamezniki postavljajo na čelo jate (slika 6), bodo imeli sedaj ti posamezniki še večji vpliv na celotno jato in tako še bistveno bolj pripomogli k povečanju polarizacije in elongacije.



Slika 13. Prikaz strukture jate, kadar spreminjamo območje zaznave $(360° - \eta)$. a) Polarizacija (P) jate v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov (p). Z manjšanjem območja zaznave, se nelinearnost med polarizacijo in deležem informiranih posameznikov p povečuje. b) Elongacija (E) jate v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov p. Maksimum elongacije se z manjšanjem območja zaznave povečuje in pomika proti manjšim vrednostim informiranih posameznikov. $N = 50$, $\omega = 0{,}5$, $\alpha = 1$, $\rho = 6$, $\Delta t = 0{,}2$, $v_0 = 1$.

5 Zaključek

V diplomskem seminarju smo preučevali vodenje v modelu živalske jate. Naprej smo na osnovi treh definiranih območij: območje odboja, območje kohezije in območje poravnave, izdelali osnovni računalniški model, ki opisuje interakcije med posamezniki v jati in gibanje jate. V nadaljevanju smo model nadgradili s sistemom vodenja znotraj jate z vpeljavo deleža populacije, ki ima informacijo o preferenčni smeri gibanja. Pravilnost modela smo preverili tako, da smo simulirali gibanje jate in med gibanjem zajemali in izrisovali lege posameznikov in njihove trenutne hitrosti. Po uspešni implementaciji modela smo izračunali polarizacijo in elongacijo jate v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov. Ugotovili smo, da večja kot je jata, manjši delež informiranih posameznikov je potrebnih za uspešno prenašanje

informacije. Nato smo spreminjali preferenčno utež, s katero določimo, kako močno informirani posamezniki dajejo prednost določeni smeri, in delež informiranih posameznikov ter preučevali elongacijo jate in s tem verjetnost, da se jata razkropi. Kadar je delež informiranih posameznikov med 0,1 in 0,2, smo ugotovili, da je verjetnost, da jata razpade, velika. Iz tega se da sklepati, da je za preživetje živalskega kolektiva zelo pomembno, da informirani posamezniki še vedno upoštevajo lokalne interakcije z ostalimi posamezniki v jati. V zaključnem delu seminarja smo v model dodali območje zaznave. To je omejeno območje, znotraj katerega posameznik zazna ostale posameznike. Ob spreminjanju velikosti tega območja smo preučevali polarizacijo in elongacijo jate v odvisnosti od deleža informiranih posameznikov. Ugotovili smo, da z manjšanjem območja zaznave jata postaja vedno bolj polarizirana in elongirana.

Model, ki smo ga preučevali v tem diplomskem seminarju, nudi ogromno možnosti za nadgradnje in nadaljnje delo. Lahko bi raziskovali verjetnost, da se jata razkropi, če bi le informirani posamezniki imeli drugačno območje zaznave kot ostali. Pomemben vidik komunikacije znotraj jate je tudi časovni zamik pri prenosu informacij [18]. Veljajo bi preučiti, kako na natančnost gibanja in vodenja jate vplivajo zamiki v interakcijah med posamezniki. Zelo zanimivo bi bilo tudi preveriti, kako heterogenost posameznikov vpliva na same interakcije znotraj jate in s tem seveda tudi na dinamiko celotnega kolektiva [19].

Kljub temu, da uporabljeni parametri za model temeljijo na opisu jate ptic, predvidevamo, da rezultate lahko posplošimo in so uporabni za vsak tovrsten samo-organizacijski živalski kolektiv. Rezultati, ki jih pridobivamo preko preučevanja kolektivne dinamike živalskih vrst, bi lahko v prihodnosti bili ključnega pomena, saj nam dajejo nov pogled v učinkovitejši prenos informacij znotraj sistemov, kot so jata robotov v vodi, na zemlji ali tudi v zraku [20].

VIRI IN LITERATURA

[1] J. K. Parrish, S.V. Viscido in D. Grünbaum, *Self-organized Fish Schools: An Examination of Emergent Properties*, Biol. Bull. **202**, 296-305 (2002).

[2] H. Hildenbrandt, C. Carere in C. K. Hemelrijk, *Self-organized aerial displays of thousands of starlings: a model*, Behav. Ecol. **21**, 1349-1359 (2010).

[3] I. D. Couzin in J. Krause, *Self-Organization and Collective Behavior in Vertebrates*, Adv. Study Behav. **32,** 1-75 (2003).

[4] R. Jeanson, C. Rivault, J. L. Denebourg, S. Blanco, R. Fournier, C. Jost in G. Theraulaz, *Self-organized aggregation in cockroaches*, Anim. Behav. **69**, 169-180 (2005).

[5] T. J. Pitcher, B. L. Partridge in C. S. Wardle, *A blind fish can school*, Science **194**, 963-965 (1976).

[6] S. R. Witkin, *The Importance of Directional Sound Radiation in Avian Vocalization*, The Condor **79**, 490–493 (1977).

[7] L. Conradt, J. Krause, I. D. Couzin in T. J. Roper, *Leading according to need in self-organized groups*, Am. Nat. **173**, 304-312 (2009).

[8] I. D. Couzin, J. Krause, R. James, G. D. Ruxton in N. R. Franks, *Collective memory and spatial sorting in animal groups*, J Theor. Biol. **218**, 1-11 (2002).

[9] A. Kolpas, M. Busch, H. Li, I. Couzin, L. Petzold in J. Moehlis, *How the spatial position of individuals affects their influence on swarms: a numerical comparison of two popular Swarm dynamics models*, PLoS ONE **8(3)**, e58525 (2013).

[10] J. Ren, W. Sun, D. Manocha, A. Li in X. Jin, *Stable information transfer network facilitates the emergence of collective behavior of bird flocks*, Phys. Rev. E **98**, 052309 (2018).

[11] S.H. Lee, *Predator's attack-induced phase-like transition in prey flock*, Phys. Lett. A **357**, 270-274 (2006).

[12] I. D. Couzin, J. Krause, N. R. Franks in S. A. Levin, *Effective leadership and decision-making in animal groups on the move*, Nature **433**, 513-516 (2005).

[13] C. W. Reynolds, *Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model*, Comput. Graph. **21(4)**, 25-34 (1987).

[14] I. D. Couzin, C. C. Ioannou, G. Demirel, T. Gross, C. J. Torney, A. Hartnett, L. Conradt S.A Levin in N. E. Leonard, *Uninformed individuals promote democratic consensus in animal groups*, Science **334**, 1578–1580 (2011).

[15] M. Lindauer, *Communication in swarm-bees searching for a new home*, Nature **179**, 63–66 (1957).

[16] N. Miller, S. Garnier, A. T. Hartnett, I.D. Couzin, *Both information and social cohesion determine collective decisions in animal groups*, Proc. Natl. Acad. Sci. **110(13)**, 5263-5268 (2013).

[17] W. Swaney, J. Kendal, H. Capon, C. Brown in K. N. Laland, *Familiarity facilitates social learning of foraging behaviour in the guppy*, Anim. Behav. **62**, 591-598 (2001).

[18] J. Ren, W. Sun, D. Manocha, A. Li in X. Jin, *Stable information transfer network facilitates the emergence of collective behavior of bird flocks*, Phys. Rev. E **98**, 052309 (2018).

[19] M. C. Miguel, J. T. Parley in R. Pastoras-Satorras, *Effects of Heterogeneous Social Interactions on Flocking Dynamics*, Phys. Rev. Lett. **120**, 068303 (2018).

[20] H. Hamann, *Swarm Robotics: A Formal Approach* (Springer International Publishing AG, New York , 2018).