

اثر انعطاف پذیری افراد در پذیرش الگوهای رفتاری بر کنترل بیماری

حاجیان فروشانی، سجاد¹؛ عظیمی، ناهید¹

¹دانشکده فیزیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه‌ی زنجان، زنجان

چکیده

بین شیوع بیماری و عقیده افراد جامعه ارتباط دو طرفه‌ای وجود دارد. در این کار اثر متقابل انتشار بیماری و پذیرش الگوهای پیشگیرانه را روی یک شبکه دو لایه‌ای مطالعه می‌کنیم. ابتدا نشان می‌دهیم که وجود تفاوت در نگرش افراد، کنترل شیوع بیماری را ساده‌تر می‌کند. سپس به بررسی تأثیر عدم مشارکت افراد مهم و حضور افراد متعصب در رعایت الگوهای پیشگیرانه می‌پردازیم و نشان می‌دهیم هر دو به پیشروی بیماری کمک می‌کند. همچنین آستانه پذیرش افراد را وابسته به میزان همه‌گیری بیماری در نظر می‌گیریم و نشان می‌دهیم میزان حساسیت افراد به میزان همه‌گیری تأثیر بیشتری در کنترل بیماری خواهد داشت.

Effect of People's Flexibility in Accepting Behavioral Patterns on Disease Control

Hajian, Sajjad¹; Azimi, Nahid¹

¹ Department of Physics, Institute for advanced studies in basic sciences (IASBS), Zanjan,

Abstract

There is a two-way interaction between the spread of the disease and community opinion. On a two-layer network, this paper investigates the interaction impact of disease transmission and the adoption of preventative strategies. First, we demonstrate that variations in people's views make it simpler to restrict disease transmission. Then we investigate the influence of significant people's non-participation and the existence of fanatics on the learning of protective patterns and show that both contribute to the disease's growth. We then demonstrate how increasing epidemic size can lead to increased coverage and improved disease management.

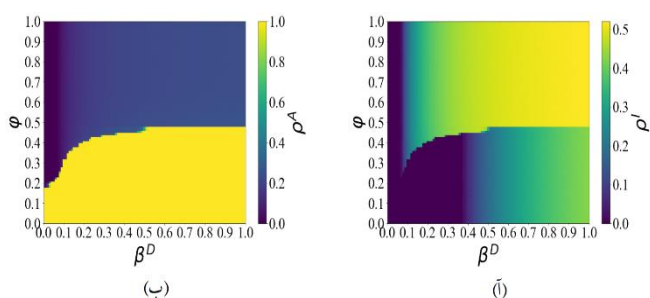
PACS No.

مقدمه

دیگر افراد در جامعه از میزان اهمیت متفاوتی برخوردارند و بعضی از آن‌ها به دلیل جایگاه اجتماعی خاصشان اثرگذاری بیشتری بر فراگیری الگوها دارند، بنابراین سوال به جایی است اگر پرسیم که عدم مشارکت افراد با اهمیت در پذیرش الگوهای پیشگیرانه چه تأثیری بر کنترل بیماری دارد. همچنین حضور افراد متعصب که حاضر به پذیرش الگوهای پیشگیرانه نیستند، ممکن است کنترل بیماری را به چالش بکشد. از دیگر عواملی که ممکن است بر روند فراگیری الگوهای رفتاری اثرگذار باشد، اندازه‌ی همه‌گیری بیماری در آن زمان است که می‌تواند حائز اهمیت باشد. در این مقاله به دنبال یافتن پاسخی برای این سوالات هستیم و در پایان تطابق نتایج دو روش زنجیره مارکوف و شبیه‌سازی را نشان می‌دهیم.

مدل عقیده-بیماری

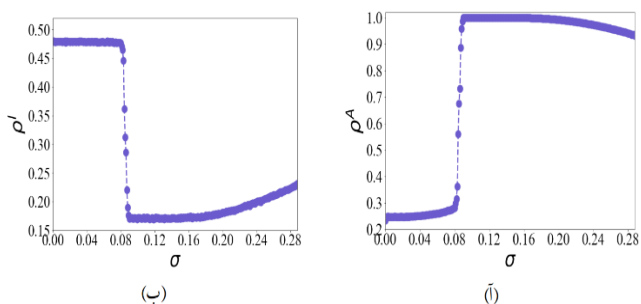
یکی از عوامل مؤثر بر کنترل همه‌گیری بیماری، رفتارهای اجتماعی افراد و رعایت الگوهای پیشگیرانه است که پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است [1-3]. این که یک فرد متقاعد به رعایت کردن این الگوها شود می‌تواند وابسته به این باشد که تعداد زیادی از اطرافیان در حال پیشگیری باشند. بنابراین می‌توان برای هر فرد یک آستانه‌ی پذیرش در نظر گرفت، که اگر تعداد اطرافیان پذیرنده فرد از آن بیشتر شود، خود فرد نیز پذیرنده می‌شود. به دلیل وجود تفاوت‌های شخصیتی در بین افراد می‌توان آستانه‌ی پذیرش هر فرد را متفاوت از حد آستانه‌ی فرد دیگر دانست و سوال مهمی که مطرح می‌شود این است که وجود این تفاوت‌ها چه تأثیری بر فراگیری و متعاقباً بر کنترل همه‌گیری خواهد داشت. از طرف



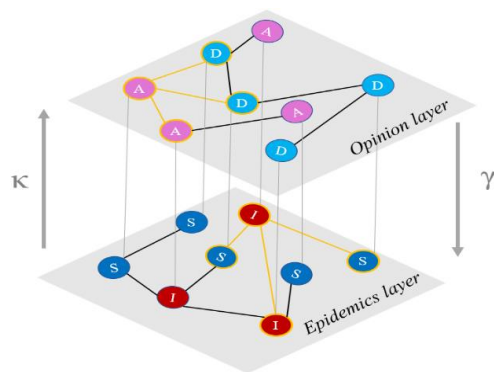
شکل ۲: فضای فاز مدل در صفحه β^D و β^A . چگالی رأس‌های (آ) بیمار و (ب) پذیرنده در حالت پایای سیستم که با آنسامبل‌گیری بروی ۲۵ شبکه اردوش-رنی با $N=10^4$, $\gamma=0.2$, $\langle k \rangle=10$, $\rho_0=0.1$, $\mu=0.8$ و $K=0.5$ بدست آمده است.

نتایج

در ابتدا به بررسی تأثیر حد آستانه ϕ بر کنترل بیماری می‌پردازیم و مقدار آن را برای همه‌ی رأس‌ها یکسان در نظر می‌گیریم. در شکل ۲ (آ) می‌توان دید که با افزایش مقدار ϕ ، آستانه‌ی همه‌گیری بیماری کاهش می‌یابد و چگالی رأس‌های بیمار - که با ρ نشان می‌دهیم - افزایش می‌یابد. با کمی دقت در هر دو قسمت شکل ۲ می‌توان دید که به ازای مقادیر ϕ کوچک، در لایه‌ی عقیده آبخار سراسری رخ می‌دهد و همین امر سبب می‌شود که آستانه‌ی همه‌گیری بیماری به طور چشمگیری بزرگ شود و چگالی افراد بیمار کاهش یابد. با این حال به ازای مقادیر خاصی از ϕ شاهد تأثیر دو مرحله‌ای این پارامتر بر لایه‌ی بیماری هستیم که بدلیل وجود احتمال خودآگاهی رخ می‌دهد (در همه شکل‌ها مقدار پارامترها



شکل ۳: چگالی رأس‌های (آ) بیمار و (ب) پذیرنده بر حسب σ که با آنسامبل‌گیری بروی ۵۰ شبکه اردوش-رنی با $\phi_{\text{mean}}=0.5$ بدست آمده است. یکسان است).



شکل ۱: نمایش مدل عقیده-بیماری.

مطابق شکل ۱ یک شبکه مولتی‌پلکس^۱ دو لایه با N رأس ثابت در نظر می‌گیریم. لایه‌ی پایین را لایه‌ی بیماری و لایه‌ی بالا را لایه‌ی عقیده می‌نامیم که در آن‌ها به ترتیب یال‌ها ارتباطات فیزیکی و دوستانه بین افراد را نشان می‌دهد.

در لایه‌ی بیماری، انتشار بیماری مطابق مدل دینامیکی سالم-بیمار-سالم^۲ (SIS) اتفاق می‌افتد. در این مدل یک رأس سالم در مجاورت یک رأس بیمار ممکن است با احتمال β بیمار شود و یک رأس بیمار به صورت خود به خودی و با احتمال μ بهبود یابد. در لایه‌ی عقیده نیز افراد دو حالت پذیرنده^۳ (A) و ردکننده^۴ (D) دارند و با پیروی از مدل دینامیکی آستانه‌ای^۵ دو طرفه، تغییر حالت می‌دهند. در این مدل برای رأس i یک حد آستانه ϕ_i در نظر می‌گیریم. اگر نسبت رأس‌های همسایه‌ی پذیرنده رأس i به همه همسایه‌های این رأس (درجه‌ی رأس) از حد آستانه بزرگتر شود، رأس i نیز پذیرنده و در غیر این صورت ردکننده خواهد شد.

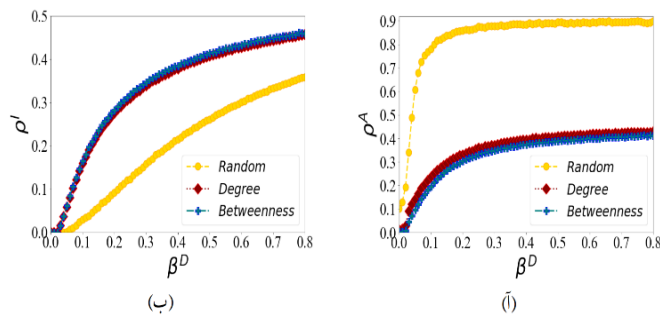
قسمت مهم این مدل جفت‌شدگی دو دینامیک و تأثیرگذاری این دو به روی یکدیگر است. برای این منظور فرض می‌کنیم که احتمال بیمار شدن یک رأس سالم و پذیرنده با ضریب $\gamma < 1$ کاهش می‌یابد. در نتیجه اگر احتمال بیمار شدن یک رأس ردکننده را با β^D نشان دهیم، احتمال بیمار شدن یک رأس پذیرنده $\beta^A = \gamma \beta^D$ است. به همین صورت اگر رأس ردکننده‌ای بیمار شود ممکن است با احتمال K تغییر عقیده داده و پذیرنده شوند. در این مدل γ را ضریب ایمن‌سازی^۶ و K را ضریب خودآگاهی^۷ می‌نامیم.

immunization⁶
self-awareness⁷

acceptor³
denier⁴
threshold⁵

multiplex network¹
susceptible-infected-²
susceptible

متعصب بر اساس مرکزیت درجه تعیین شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌کنیم، جایگاه اجتماعی فرد متعصب نیز در این زمینه حائز اهمیت



شکل ۴: چگالی رأس‌های (آ) بیمار و (ب) پذیرنده بر حسب احتمال ابتلا β^D که با آنسامبل‌گیری بروی ۵۰ شبکه بی‌مقیاس است. نمودار آبی، قرمز و زرد به ترتیب تعیین حد آستانه با استفاده از مرکزیت بینابینی، مرکزیت درجه و به صورت تصادفی را نشان می‌دهند. است.

اندازه‌ی همه‌گیری را می‌توان به صورت زیر مؤثر بر آستانه پذیرش افراد در نظر گرفت:

$$\varphi_i(t+1) = \begin{cases} \varphi_i^0 + \alpha \rho^l(t) & \varphi_i(t+1) > 0 \\ \varphi_i^0 & \varphi_i(t+1) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، α میزان حساسیت افراد به چگالی افراد مبتلا را نشان می‌دهد. همانطور در شکل ۶ (آ) مشاهده می‌شود افزایش α به رخ دادن آبخار سراسری کمک می‌کند و متعاقباً باعث بزرگ شدن آستانه‌ی همه‌گیری به میزان قابل توجهی می‌شود. پس می‌توان گفت که حساسیت افراد به اندازه همه‌گیری به کنترل بیماری کمک می‌کند. این مدل را می‌توان با روش میکروسکوپی زنجیره مارکوف نیز بررسی کرد که معادلات آن به صورت زیر است:

$$p_i^{DS}(t+1) = p_i^{AI}(t)\mu r_i(t) + p_i^{DS}(t)r_i(t)q_i^l(t) + p_i^{AS}(t)r_i(t)q_i^l(t) + p_i^{DI}(t)\mu r_i(t) \quad (2)$$

$$p_i^{AS}(t+1) = p_i^{AI}(t)\mu(1-r_i(t)) + p_i^{DS}(t)(1-r_i(t))q_i^A(t) \quad (3)$$

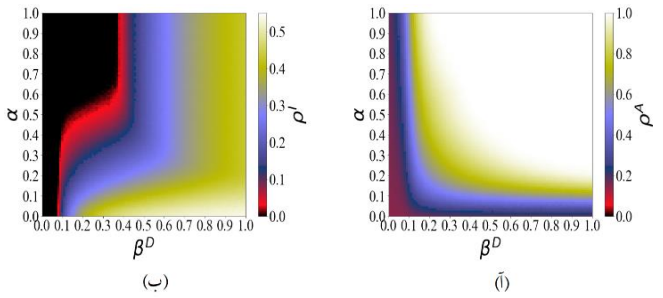
$$p_i^{AI}(t+1) = p_i^{AI}(t)[(1-r_i(t))(1-\mu) + \kappa(1-\mu)r_i(t)] + p_i^{DS}(t)[(1-q_i^A(t))((1-r_i(t)) + \kappa r_i(t))]$$

در ادامه برای آن که بتوانیم تأثیر نگرش‌های متفاوت بین افراد را بر فراگیری آبخاری الگوی رفتاری مشاهده کنیم با استفاده از یک تابع توزیع نرمال با انحراف از معیار σ به هر رأس شبکه یک مقدار متفاوت φ در بازه‌ی بین ۰ تا ۱ نسبت می‌دهیم. σ معیاری برای سنجش میزان تفاوت نگرش در بین افراد است. همانطور که در شکل ۳ (آ) دیده می‌شود بزرگ شدن مقدار σ باعث افزایش ناگهانی چگالی رأس‌های پذیرنده و متعاقباً کاهش چشم‌گیر چگالی رأس‌های بیمار می‌شود (شکل ۳ (ب)). در نتیجه می‌توان گفت که وجود اختلاف نگرش بین افراد جامعه به فراگیری بهتر الگوی رفتاری و متعاقباً به کنترل بهتر بیماری کمک شایانی می‌کند.

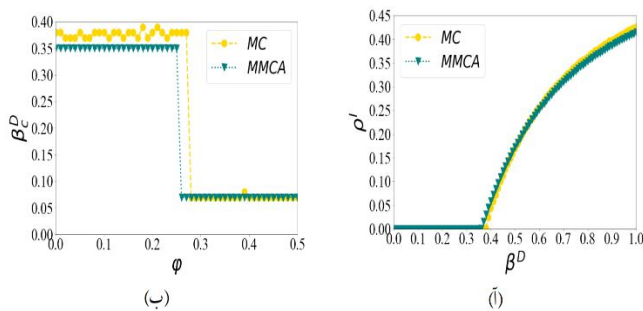
در یک جامعه افراد از نظر میزان تأثیرگذاری و اهمیت یکسان نیستند. از معیارهای مرکزیت برای مشخص شدن اهمیت رأس‌ها استفاده می‌شود. از یک تابع توزیع یکنواخت برای مقادیر حد آستانه استفاده می‌کنیم و به مهم‌ترین رأس‌ها بزرگترین حد آستانه‌ها را نسبت می‌دهیم. در شکل ۴ نمودار آبی و قرمز به ترتیب برای حالتی است که حد آستانه با استفاده از مرکزیت بینابینی^۱ و مرکزیت درجه^۲ تعیین شده است و نمودار زرد برای حالت تصادفی است. همانطور که در شکل ۴ (آ) می‌بینید، فراگیری آبخاری برای حالتی که از معیارهای مرکزیت استفاده شده است نسبت به حالت تصادفی، کمتر اتفاق افتاده است و متعاقباً بیماری پیشروی بیشتری داشته است (شکل ۴ (ب)). پس می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که افراد مهم و اثرگذار در انتشار الگوی رفتاری پیشگیرانه همراهی نکنند، افراد کمتری پذیرنده‌ی این رفتار خواهند شد و بیماری پیشروی بیشتری خواهد داشت.

حضور افراد متعصب^۳ که تحت هیچ شرایطی حاضر به تغییر رفتار خود نیستند یکی دیگر از چالش‌های موجود در پذیرش الگوهای رفتاری است. در شکل ۵ (آ) مشاهده می‌کنیم که افزایش چگالی رأس‌های متعصب باعث کاهش میزان فراگیری آبخاری می‌شود تا جایی که چگالی رأس‌های پذیرنده را به صفر می‌رساند و متعاقباً باعث پیشروی بیشتر بیماری می‌شود (شکل ۵ (ب)). در این شکل نمودار رنگ زرد برای حالتی است که رأس‌های متعصب به صورت تصادفی و نمودار رنگ سبز برای حالتی است که رؤس

متعصب در رعایت نکردن الگوهای پیشگیرانه تأثیر مخربی بر کنترل بیماری دارد. همچنین مشاهده کردیم که حساسیت افراد به میزان همه‌گیری می‌تواند به کنترل بهتر بیماری منجر شود. در پایان نیز همخوانی بسیار خوبی نتایج روش میکروسکوپی زنجیره مارکوف و شبیه‌سازی عددی را نشان دادیم.



شکل ۶: فضای فاز مدل در صفحه β^D و α . چگالی رأس‌های (آ) بیمار و (ب) پذیرنده که با آنسامبل‌گیری بروی ۲۵ شبکه اردوش-رنی با $K=0$ بدست آمده است.



شکل ۷: (آ) چگالی رأس‌های بیمار برحسب احتمال ابتلا β^D برای $\varphi = 0.2$. (ب) آستانه‌ی همه‌گیری بیماری برحسب حد آستانه پذیرش φ با آنسامبل‌گیری بروی ۵۰ شبکه اردوش-رنی. نمودار زرد نتیجه شبیه‌سازی و نمودار سبز نتیجه حل به روش میکروسکوپی زنجیره مارکوف است.

مرجع‌ها

- [1] Granell, Clara, et al.; Physical Review Letters, 111(12):128701, (2013).
- [2] Granell, Clara, et al.; Physical Review E, 90(1):012808, (2014).
- [3] Wang, Zhishuang and Xia, Chengyi; Nonlinear Dynamics, 102(4):3039–3052, (2020).

$$+p_i^{AS}(t) \left[(1-r_i(t)) (1-q_i^A(t)) + \kappa(1 - q_i^D)r_i(t) \right] \quad (۴)$$

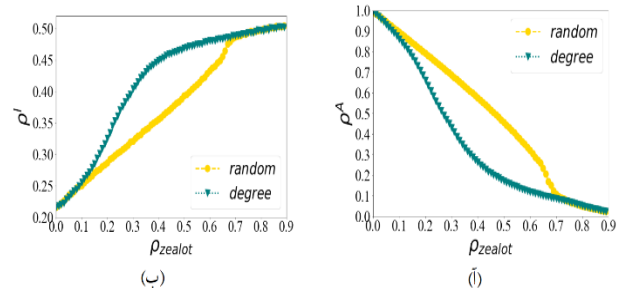
$$+p_i^{DI}(t)[(1-r_i(t))(1-\mu) + \kappa(1-\mu)r_i(t)] \\ p_i^{DI}(t+1) = p_i^{AI}(t)[(1-\mu)(1-\kappa)r_i(t)] \\ +p_i^{DS}(t)[(1-\kappa)(1-q_i^D(t))(1-r_i(t))] \\ +p_i^{AS}(t)[(1-\kappa)(1-q_i^D(t))(1-r_i(t))] \\ +p_i^{DI}(t)(1-\mu)(1-\kappa)(1-r_i(t)) \quad (۵)$$

در این مدل برای هر رأس چهارحالت وجود دارد که $p_i(t)$ نشان دهنده احتمال بودن رأس i در زمان t در یکی از این حالت‌هاست. همچنین منظور از $q_i(t)$ احتمال بیمار نشدن و $r_i(t)$ احتمال پذیرنده نشدن رأس i در زمان t است که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$q_i^A(q_i^D)(t) = \prod_j [1 - \beta^A(\beta^D)p_j^A(t)b_{ij}] \quad (۶)$$

$$r_i(t) = H \left(\varphi_i - \frac{\sum_j a_{ij} p_j^A(t)}{k_i} \right) \quad (۷)$$

در دو معادله‌ی ۶ و ۷ عبارت a_{ij} و b_{ij} به ترتیب نشان دهنده عناصر ماتریس مجاورت لایه‌ی عقیده و لایه بیماری هستند. تطابق بسیار خوب بین نتایج شبیه‌سازی و این روش را می‌توانید در شکل ۷ مشاهده کرد.



شکل ۸: چگالی رأس‌های (آ) بیمار و (ب) پذیرنده بر حسب چگالی رأس‌های متعصب $\rho_{zealots}$ که با آنسامبل‌گیری بروی ۵۰ شبکه اردوش-رنی با $\beta^D = 0.05$ است. نمودار سبز و زرد به ترتیب تعیین رأس‌های متعصب با استفاده از مرکزیت درجه و به صورت تصادفی را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

بین همه‌گیری بیماری و عقاید افراد ارتباط متقابلی وجود دارد. در این مقاله تأثیر متقابل همه‌گیری بیماری و فراگیری الگوهای رفتاری پیشگیرانه را بر روی یک شبکه دو لایه‌ای بررسی کردیم. دیدیم که وجود اختلاف نگرش بین افراد به کنترل بیماری می‌انجامد. در ادامه نشان دادیم که عدم مشارکت افراد مهم جامعه و حضور افراد