

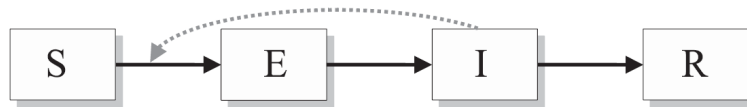
# مدلسازی پدیده های آماری آزمون پایانی - قسمت دوم

علی ستاره کوب  
شماره دانشجویی: ۹۵۱۰۰۴۹۱

۱۰ تیر ۱۴۰۰

## فهرست مطالب

۳	۱ خلاصه
۳	۲ الف: <b>SEIR</b> بر روی شبکه اردوش-رنی
۸	۳ ب: اضافه کردن واکسیناسیون
۱۰	۴ ج: اضافه کردن قرنطینه
۱۶	۵ د: بررسی نتایج
۱۷	۶ ه: تاثیر میانگین درجه رئوس (امتیازی)
۱۷	۱.۶ درجه راس کمتر
۲۵	۲.۶ درجه راس بیشتر



شکل ۱: شکل شماتیک مدل SEIR [۱]

## ۱ خلاصه

در این تمرین می خواهیم مدل SEIR را بر روی شبکه اردوش-رنی<sup>۱</sup> پیاده سازی کنیم. شکل شماتیک این مدل را در شکل ۱ می بینید. در این مدل S بیانگر افراد مستعد، E بیانگر افراد در معرض بیماری قرار گرفته، I بیانگر افراد بیمار و R بیانگر افراد بهبود یافته می باشند.

## ۲ الف: SEIR بر روی شبکه اردوش-رنی

قسمت اصلی این برنامه را کلاس seir تشکیل می دهد. در این کلاس تمامی متغیر ها و متد های مورد نیاز پیاده سازی شده اند که به اختصار آنها را شرح می دهیم. ابتدا ورودی های این کلاس را معرفی می کنیم:

۱. n: تعداد رئوس
۲. beta: احتمال انتقال
۳. sigma: دوران نهفتگی
۴. gamma: احتمال بهبودی
۵. k: میانگین درجه رئوس
۶. v: احتمال واکسینه شدن
۷. q: احتمال قرنطینه شدن
۸. q days: تعداد روز های قرنطینه
۹. p q: کسر اعمال شده نسبت به احتمال انتقال عادی برای احتمال انتقال بیماری افراد قرنطینه شده
۱۰. seed: هسته استفاده شده برای برای راه اندازی اولیه شبکه

---

Erdős-Rényi<sup>۱</sup>

برای هر شی ساخته شده با این کلاس یک گراف اردوش-رنی با میانگین درجه رئوس  $k$  با استفاده از کتابخانه `Networkx` [۲] در پایتون می‌سازیم. همچنین تعدادی متغیر، مانند احتمال انتقال بیماری، احتمال بهبودی و دوره نهفتگی را به عنوان متغیر برای این شی تعریف می‌کنیم که از آنها در متدهای دیگر کلاس استفاده می‌کنیم. در ادامه به بررسی متدهای موجود در این کلاس می‌پردازیم:

متد **initiate**: این متد وظیفه‌ی راه اندازی شبکه با استفاده از شرایط اولیه داده شده را دارد. شرایط اولیه پیش فرض بصورت یک نفر بیمار و بقیه مستعد می‌باشند. اما می‌توان هر شرایط اولیه دلخواهی را به نسبت افراد سالم و بیمار برای شبکه تعیین کرد. ما در سراسر این برنامه از همین شرایط اولیه پیشفرض استفاده کرده ایم. همچنین در این متد برای هر اس ۶ ویژگی تعریف کرده ایم که بصورت زیر می‌باشند:

۱. **now**: بیانگر وضعیت کنونی راس می‌باشد
۲. **tomorrow**: بیانگر وضعیت راس در گام زمانی بعدی می‌باشد.
۳. **e time**: بیانگر مدت زمان گذشته از دوران نهفتگی می‌باشد.
۴. **q time**: بیانگر مدت زمان گذشته از زمان قرنطینه شدن راس می‌باشد.
۵. **beta**: بیانگر احتمال انتقال بیماری توسط این راس می‌باشد.
۶. **q condition**: بیانگر قرنطینه بودن یا نبودن راس است که به ترتیب با صفر و یک نشان می‌دهیم.

هر راس می‌تواند ۴ وضعیت  $s, e, i$  و  $r$  را به خود بگیرد.

متد **SE**: این متد وظیفه انتقال افراد از حالت سالم  $S$  به حالت  $E$  ببرد. برای این کار، بر روی تمام راس‌های بیمار حلقه می‌زنیم و برای هر همسایه این رئوس یک عدد بین صفر و یک با توزیع یکنواخت تولید می‌کنیم و آن را با احتمال انتقال بیماری راس بیمار مقایسه می‌کنیم. اگر این عدد کمتر از این احتمال بود، حالت بعدی راس آلوده را از  $S$  به  $E$  تبدیل می‌کنیم. همچنین در هر گام زمانی راس‌های جدیدی که آلوده می‌شوند را ذخیره می‌کنیم. دقت کنید که شرط رفتن از گروه  $S$  به گروه  $E$  آن است که وضعیت کنونی و وضعیت گام بعدی راس  $S$  باشد. به عبارتی راس مورد نظر هنوز بیمار نشده باشد.

متد **EI**: این متد وظیفه دارد افراد آلوده شده به بیماری که بدون علامت هستند را پس از اتمام دوران نهفتگی به حالت بیمار منتقل کند. برای این کار در طول برنامه همواره لیستی از رئوسی که در دوران نهفتگی بسر می‌برند را نگه می‌داریم و در این متد با حلقه زدن بر روی این رئوس، ابتدا زمان نهفتگی را یک واحد اضافه می‌کنیم و اگر این زمان برابر زمان نهفتگی

بیماری شد، حالت راس در گام زمانی بعدی را از  $e$  به  $i$  تغییر می دهیم. همچنین این راس را به لیست راس هایی که در گام زمانی بعدی باید بیمار شوند، انتقال می دهیم.

**متد IR:** این متد وظیفه دارد افراد را از گروه  $I$  به گروه  $R$  ببرد. برای این کار بر روی لیست بیماران یک حلقه می زنیم و برای هر راس یک عدد تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت تولید می کنیم. اگر این عدد از احتمال بهبودی کمتر بود، حالت بعدی راس را از  $i$  به  $R$  تغییر می دهیم. همچنین این راس را به لیست بهبود یافتگان گام بعدی منتقل می کنیم.

**متد update:** این متد وظیفه دارد پس از اتمام تمام فرآیند ها در گام فعلی، وضعیت کنونی راس ها را برابر وضعیت بعدی راس ها بکند. دقت کنید که ما در این برنامه از روش روزرسانی هماهنگ<sup>۲</sup> استفاده می کنیم. یعنی حالت بعدی همه راس ها را بصورت یک جا بروز رسانی می کنیم.

**متد forward:** این متد وظیفه دارد برنامه را یک گام زمانی به جلو ببرد. در این متد ۴ متد گفته شده در بالا را پشت سر هم صدا می زنیم.

**متد total:** این متد صرفاً برای بررسی درست کار کردن برنامه تعبیه شده است و مجموع چهار گروه موجود در برنامه را در هر گام زمانی می دهد.

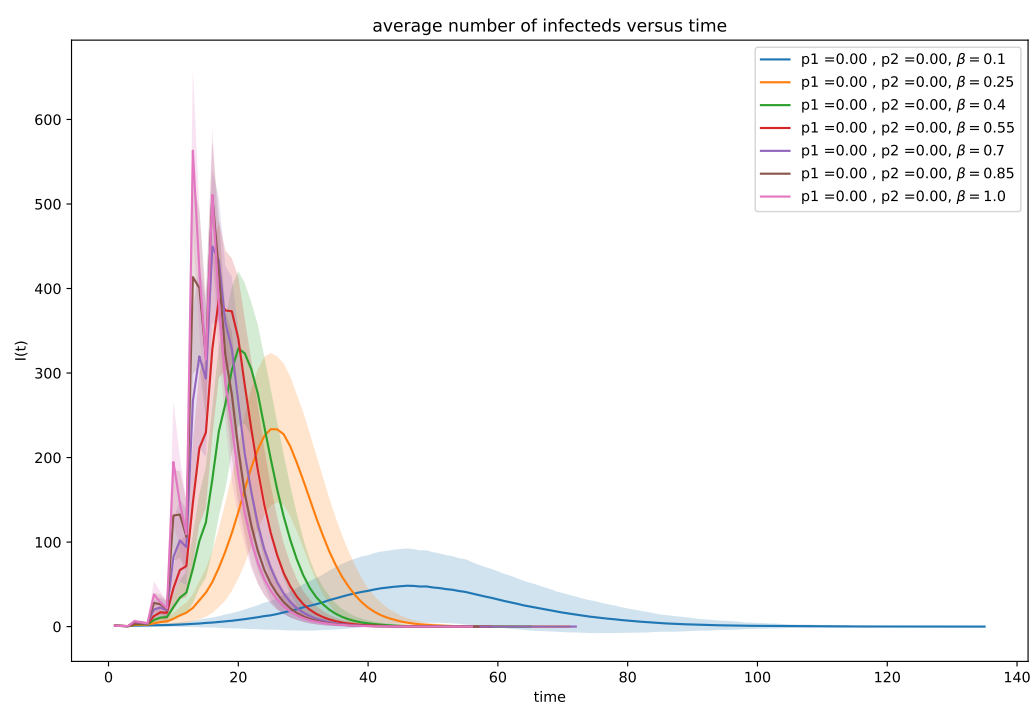
**متد run:** این متد وظیفه اجرای برنامه را دارد. این متد تعداد گام های زمانی مورد نظر را می گیرد و برنامه را به این تعداد اجرا می کند. دقت کنید که این حداقل گام زمانی مورد نیاز برنامه می باشد و در صورت تمام نشدن شیوع بیماری، برنامه را تا آنجا ادامه می دهد که هیچ بیماری در شبکه باقی نماند. همچنین در صورت تمام شدن بیماری، برنامه متوقف می شود.

نکته: در تمام این متن شرایط اولیه بصورت یک نفر بیمار و بقیه سالم می باشند. همچنین دوران نهفتگی برابر دو گام زمانی و احتمال بهبودی برابر 0.25 می باشد. احتمال انتقال بیماری نیز در برخی از نمودار ها با  $p$  و در برخی دیگر با  $\beta$  نشان داده شده است. در هر دو صورت مقادیر بکار برده شده برای این پارامتر نیز در هر نمودار نشان داده شده است. همچنین برای میانگین گیری از ۳۰۰ آنسامبل استفاده شده است مگر برای بافت نگار ها که از ۵۰۰ آنسامبل استفاده کرده ایم.

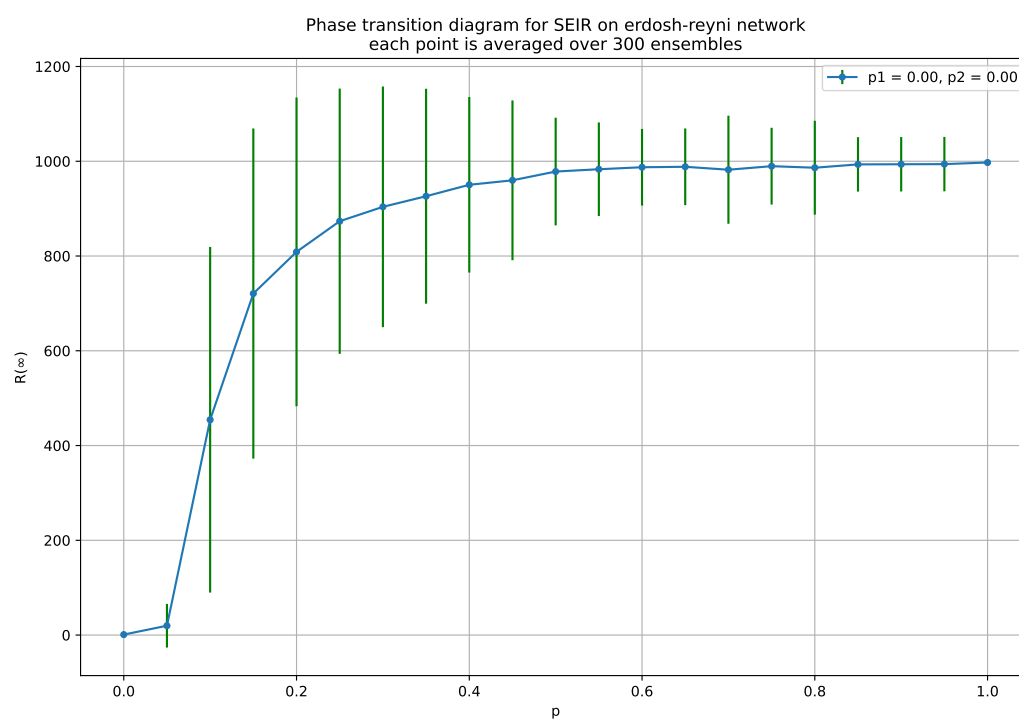
در شکل ۲ نمودار گروه بیماران بر حسب زمان را برای مدل SEIR بدون کنترل می بینید. همانطور که می بینید با زیاد شدن احتمال انتقال بیماری قله این نمودار بلند تر و زودتر اتفاق می افتد. در شکل ۳ نمودار  $R(\infty)$  بر حسب احتمال انتقال بیماری  $p$  می بینید. همانطور که دیده می شود، حوالی  $p = 0.1$  تغییر فاز رخ می دهد. همچنین حوالی این نقطه مقدار انحراف از معیار نیز زیاد است. در شکل ۴ نمودار بافت نگار تعداد افراد بهبود یافته در پایان شیوع را برای چند

---

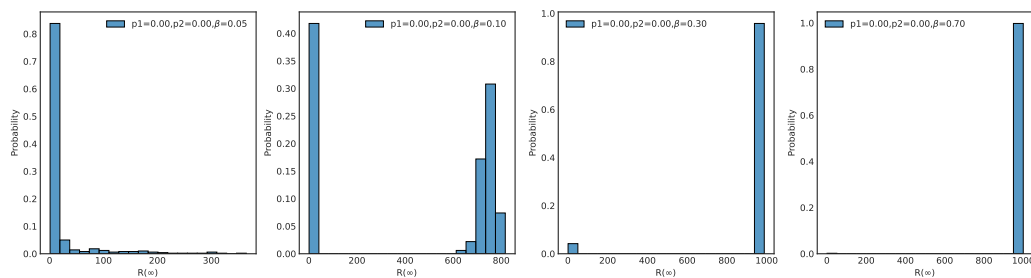
<sup>۲</sup>synchronized



شکل ۲: نمودار تعداد افراد بیمار بر حسب زمان برای چند مقدار احتمال انتقال مختلف برای مدل SEIR.



شکل ۳: نمودار  $R(\infty)$  بر حسب احتمال انتقال بیماری  $p$ . همانطور که دیده می شود حوالی 0.1 تغییر فاز رخ می دهد.



شکل ۴: نمودار بافت نگار تعداد افراد بهبود یافته در پایان شیوع برای چند مقدار مختلف احتمال انتقال بیماری. همچنین احتمال بهبودی برابر 0.25 می باشد.

مقدار مختلف احتمال انتقال بیماری می بینید. همانطور که انتظار داریم با زیاد کردن احتمال انتقال بیماری، تعداد بیشتری بیمار می شوند.

### ۳ ب: اضافه کردن واکسیناسیون

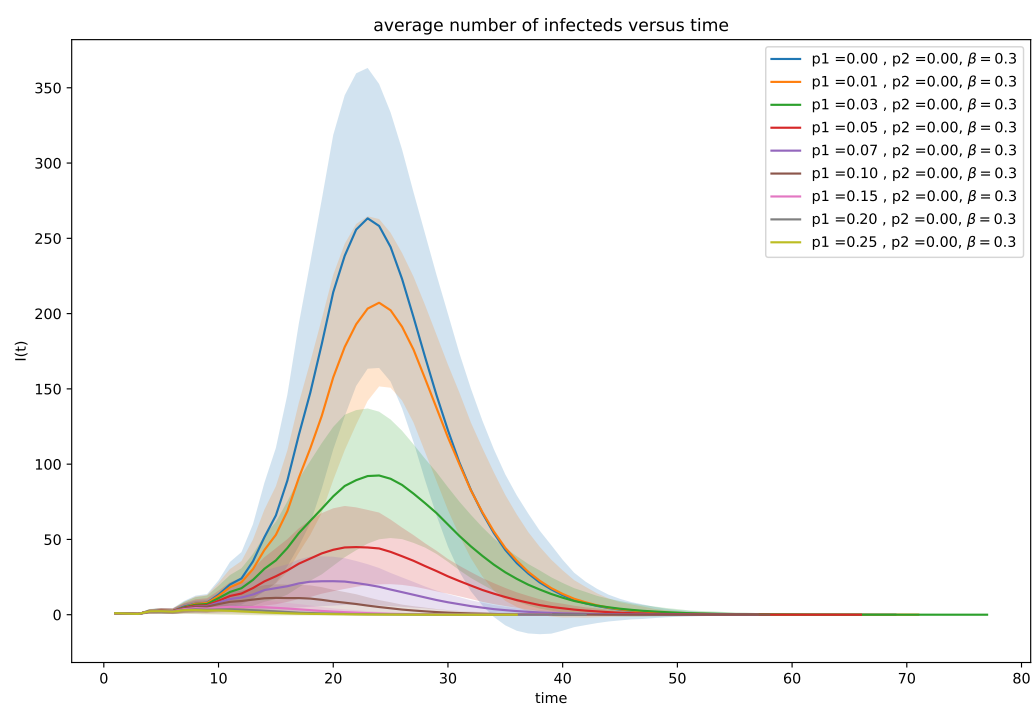
برای اضافه کردن واکسیناسیون، دو متد به برنامه اضافه می کنیم:  
متد **vaccine**: در این متد بر روی تمام راس های سالم حلقه می زنیم و یک عدد تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت تولید می کنیم. اگر این عدد از احتمال واکسینه شدن کمتر بود و همچنین حالت کنونی و بعدی آن هر دو برابر S بودند، آن راس را واکسینه کرده و حالت گام بعدی آن را از S به I تغییر می دهیم.

متد **update vaccine**: این متد همان کاری که متد **update** انجام می هد را برای گروه واکسینه شده اعمال می کند. در این متد، حالت کنونی راس هایی که واکسینه شده اند را برابر حالت آینده آنها یعنی I قرار می دهیم. دقت کنید که این رئوس را در محاسبه افراد بهبود یافته حساب نمی کنیم و فقط از برجسبی مشابه آنان استفاده می کنیم.

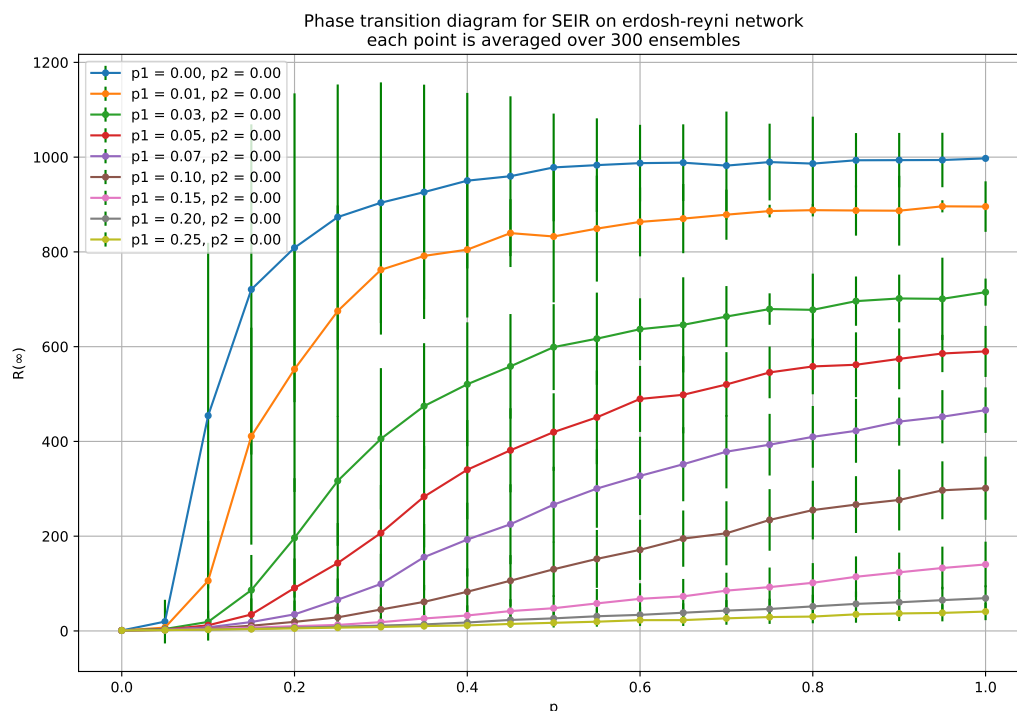
برای اعمال واکسیناسیون، این دو متد را به متد **forward** اضافه می کنیم. دقت کنید که واکسیناسیون تنها در حالتی اعمال می شود که احتمال واکسیناسیون در هنگام درست کردن یک شی **seir** مقداری غیر صفر داشته باشد. این مقدار بصورت پیش فرض صفر می باشد.

در شکل ۵ نمودار تعداد افراد بیمار برحسب زمان را برای چند مقدار مختلف  $p_1$  می بینید. همانطور که می بینید، با زیاد کردن احتمال واکسینه شدن، قله این نمودار پائین تر می آید. همچنین اوج شیوع با زیاد کردن احتمال واکسینه شدن اندکی زودتر رخ می دهد. در شکل ۶ نمودار  $R(\infty)$  برحسب احتمال انتقال بیماری را می بینید. دقت کنید که در اینجا افراد واکسینه شده را در گروه  $R$  قرار نمی دهیم. همانطور که دیده می شود، با افزایش احتمال واکسینه شدن، تعداد افراد کمتری دچار بیمار شده اند. همچنین با واکسیناسیون ۲۵ درصدی جامعه در هر گام،





شکل ۵: نمودار تعداد افراد بیمار بر حسب زمان برای چند مقدار احتمال انتقال مختلف برای مدل SEIR همراه با واکسیناسیون. احتمال واکسیناسیون برابر  $p_1$  می باشد.

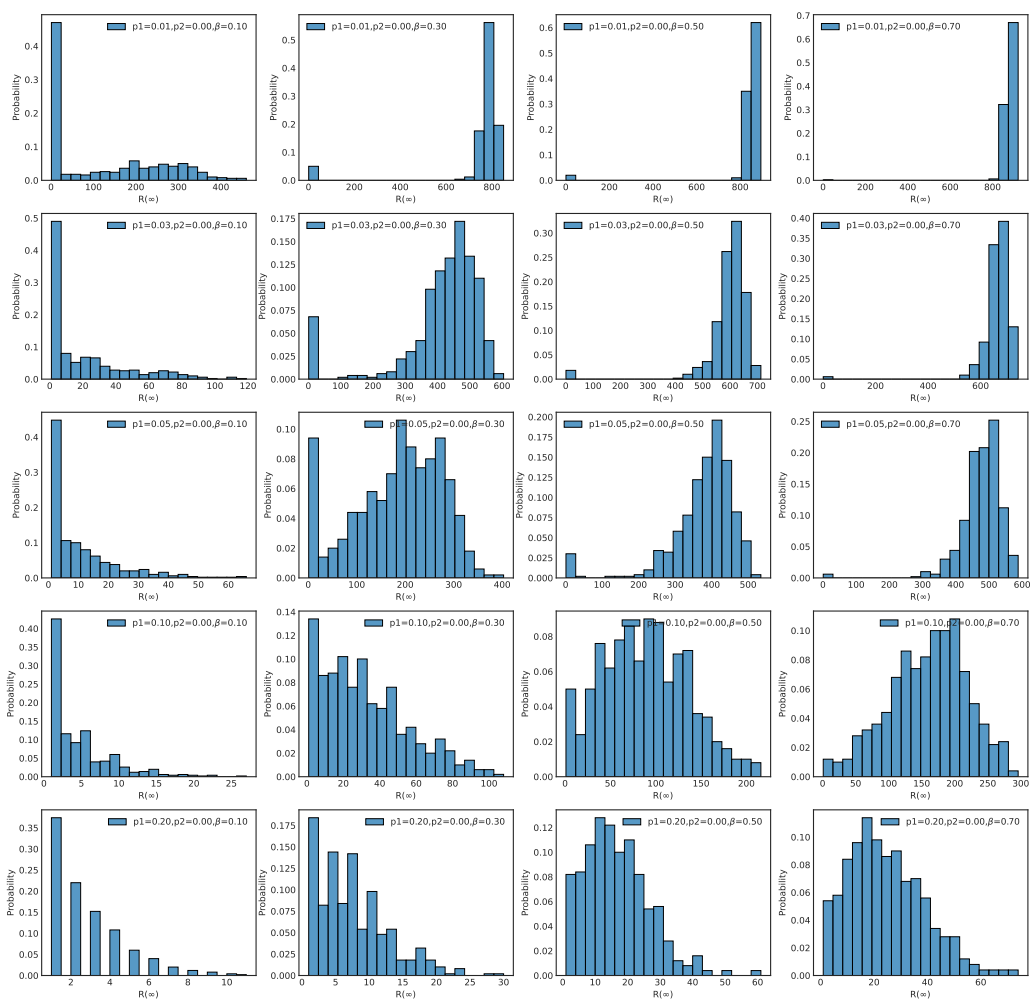


شکل ۶: نمودار  $R(\infty)$  برحسب احتمال انتقال بیماری  $p$  برای مقایسه مختلف احتمال واکسیناسیون.

بنظر می رسد تقریباً بیماری شیوع پیدا نمی کند. همچنین همانطور که دیده می شود، با زیاد کردن احتمال واکسینه شدن حتی برای احتمال انتقال بالا نیز بیماری بسیار کمتر از حالت بدون واکسن شیوع پیدا کرده است. در شکل ۷ بافت نگار  $R(\infty)$  برای چند مقدار مختلف  $p_1$  و احتمال انتقال بیماری  $\beta$  می بینید. در شکل ۸ درصد افراد واکسینه شده را برای مقادیر مختلف احتمال انتقال بیماری و  $p_1$  می بینید.

## ۴ ج: اضافه کردن قرنطینه

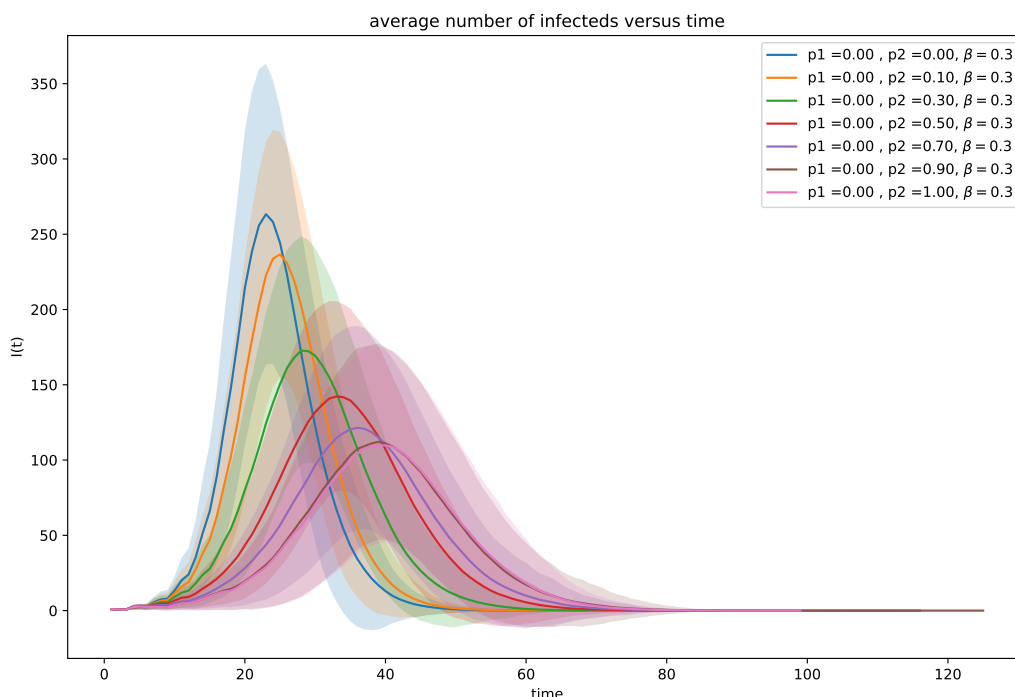
از آنجا که قرنطینه تنها برای همسایه های مستعد فرد بیمار اعمال می شود، برای اضافه کردن قرنطینه، کافی است تغییر کوچکی در متد SE اعمال کنیم. در داخل این متد یک شرط اضافه می کنیم که اگر عدد تصادفی تولید شده از احتمال قرنطینه شدن کمتر بود و همچنین وضعیت کنونی راس مستعد بود و در حال حاضر در قرنطینه نبود، آن را در قرنطینه قرار می دهیم. همچنین تمام افراد قرنطینه شده را در یک لیست نگهداری می کنیم. برای اعمال شرایط قرنطینه و بروز رسانی حالت راس های قرنطینه شده، از متد **update quarantine** استفاده می کنیم. در این متد ابتدا بر روی راس هایی که در گام فعلی قرنطینه شده اند حلقه می زنیم و احتمال انتقال



شکل ۷: بافت نگار تعداد بهبود یافتگان نهایی برای مدل SEIR با واکسن برای چند مقدار مختلف احتمال انتقال و  $p_1$ .

percentage vaccinated	
$p1=0.01, \text{beta}=0.10$	0.269183
$p1=0.01, \text{beta}=0.30$	0.269183
$p1=0.01, \text{beta}=0.50$	0.269183
$p1=0.01, \text{beta}=0.70$	0.269183
$p1=0.03, \text{beta}=0.10$	0.178720
$p1=0.03, \text{beta}=0.30$	0.178720
$p1=0.03, \text{beta}=0.50$	0.178720
$p1=0.03, \text{beta}=0.70$	0.178720
$p1=0.05, \text{beta}=0.10$	0.130810
$p1=0.05, \text{beta}=0.30$	0.130810
$p1=0.05, \text{beta}=0.50$	0.130810
$p1=0.05, \text{beta}=0.70$	0.130810
$p1=0.1, \text{beta}=0.10$	0.112930
$p1=0.1, \text{beta}=0.30$	0.112930
$p1=0.1, \text{beta}=0.50$	0.112930
$p1=0.1, \text{beta}=0.70$	0.112930
$p1=0.2, \text{beta}=0.10$	0.425447
$p1=0.2, \text{beta}=0.30$	0.425447
$p1=0.2, \text{beta}=0.50$	0.425447
$p1=0.2, \text{beta}=0.70$	0.425447

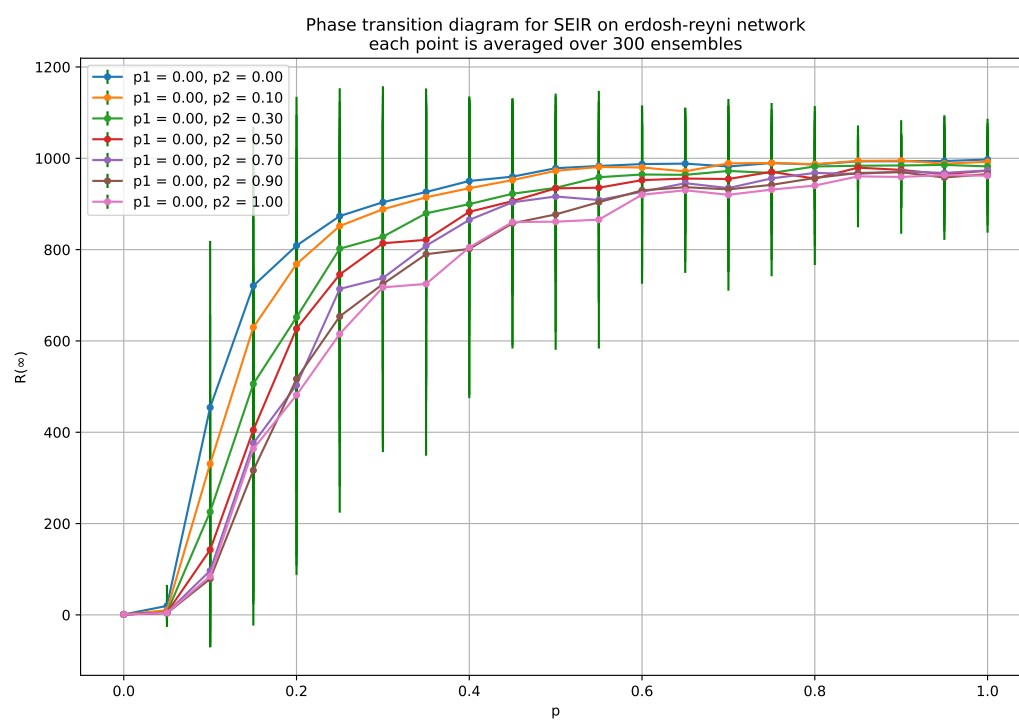
شکل ۸: جدول درصد افراد واکسینه شده در پایان شیوع.



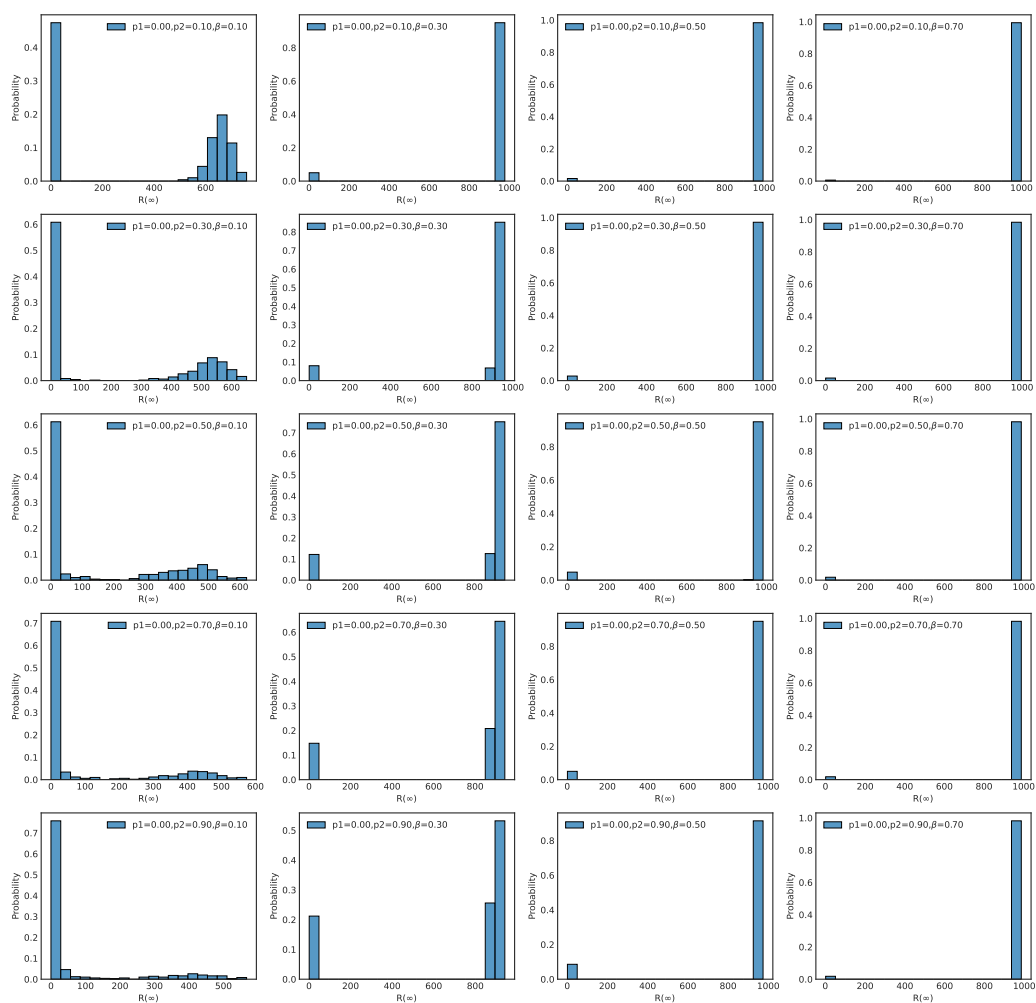
شکل ۹: نمودار تعداد بیماران برحسب زمان برای چند مقدار مختلف  $p_2$ . همانطور که می بینید افزایش احتمال قرنطینه سبب کاهش قله نمودار و دیرتر رخ دادن اوج شیوع می شود.

بیماری را برای آنها برابر احتمال جدید قرار می دهیم. سپس بر روی کل راس های قرنطینه شده حلقه می زنیم و یک واحد به زمان قرنطینه شدن آنها اضافه می کنیم. در صورتی که این زمان برابر زمان قرنطینه (۶ روز) شد این راس را از قرنطینه در می آوریم و احتمال انتقال بیماری را برای آن به حالت عادی بازمی گردانیم. همچنین حالت قرنطینه بودن این راس را نیز از ۱ به ۰ تغییر می دهیم.

در شکل ۹ نمودار بیماران برحسب زمان را برای چند مقدار مختلف  $p_2$  می بینید. همانطور که دیده می شود با افزایش احتمال قرنطینه، اوج بیماری در نقطه ای پائین تر رخ می دهد. همین طور اوج شیوع در زمان دیر تری با افزایش احتمال قرنطینه رخ می دهد. در شکل ۱۰ نمودار  $R(\infty)$  برحسب احتمال انتقال را برای چند مقدار مختلف  $p_2$  می بینید. همانطور که می بینید با افزایش احتمال قرنطینه تعداد کمتری مبتلا به بیماری شده اند. همچنین همانطور که دیده می شود، برای احتمال های شیوع بیشتر، تاثیر قرنطینه کمتر می باشد. در شکل ۱۱، نمودار بافت نگار  $R(\infty)$  را برای چند مقدار  $p_2$  و احتمال انتقال بیماری  $\beta$  می بینید.



شکل ۱۰: نمودار  $R(\infty)$  بر حسب احتمال انتقال بیماری برای چند مقدار مختلف  $p_2$ .



شکل ۱۱: بافت نگار  $R(\infty)$  برای چند مقدار مختلف  $p_2$  و احتمال انتقال بیماری  $\beta$ .

## ۵. د: بررسی نتایج

در این قسمت به بررسی تاثیر قرنطینه و واکسیناسیون با توجه به شاخص های مهم مانند تعداد فوت شدگان، تعداد تخت های بیمارستانی و سرعت واکسیناسیون می پردازیم. همانطور که در شکل ۵ دیده می شود، افزایش احتمال واکسیناسیون که معادل با افزایش سرعت واکسینه شدن افراد می باشد سبب می شود که تعداد افرادی که مستعد گرفتن بیماری می شوند کاهش یابد. از طرفی همینطور که در این شکل دیده می شود، افزایش سرعت واکسیناسیون سبب پائین آمدن تعداد افراد مبتلا در اوج بیماری شده می شود. این اتفاق بدان معناست که در شرایط واقعی واکسیناسیون می تواند در اوج بیماری سبب شود که فشار کمتری بر سیستم درمان وارد آید و تعداد تخت های خالی بیشتری برای بیماران محیا باشد. در دسترس بودن تعداد تخت های کافی سبب می شود که تعداد بیشتری از مبتلایان خدمات درمانی کافی دریافت کنند که این خود در سناریوی واقعی می تواند جان بسیاری از مبتلایان را نجات دهد. همچنین همانطور که در شکل ۶ هم دیده می شود، واکسیناسیون می تواند تاثیر بسزایی در نجات جان افراد داشته باشد. همانطور که در این شکل دیده می شود، برای نرخ انتقال های زیر 0.2 تاثیر واکسیناسیون بسیار چشمگیر است. به گونه ای که واکسیناسیون ۱ درصدی می تواند تعداد افراد نهایی مبتلا شدگان به بیماری را به یک چهارم تعداد افراد در حالت بدون واکسیناسیون برساند که به معنای کاهش چشمگیر میزان فوت شدگان می باشد. همچنین در اینجا می توان دید که هرچقدر سرعت زدن واکسن بیشتر باشد تعداد فوت شدگان کمتر می شود. از طرفی بنظر می رسد واکسیناسیون زیر یک درصد افراد جامعه برای بیماری های با احتمال انتقال بالای 0.5 چندان در تعداد نهایی بهبود یافتگان (یا فوت شدگان) موثر نیست. در شکل ۷ نیز می توان مقایسه ای کیفی میان تاثیر سرعت واکسیناسیون و احتمال انتقال بیماری انجام داد در ستون های این شکل احتمال ابتلا ثابت است و سرعت واکسیناسیون تغییر می کند. همانطور که در این شکل دیده می شود سرعت واکسیناسیون برای بیماری هایی که احتمال انتقال پائین دارند (ستون اول) چندان تاثیری ندارد و در هر صورت در بیشتر مواقع این بیماری ها در جامعه رشد نمی کنند. اما همینطور که در سطر های این نمودار جلو می رویم و احتمال ابتلا افزایش پیدا می کند، تاثیر واکسیناسیون بیشتر مشهود می شود. به گونه ای که در ستون آخر با مقایسه دو شکل اول و آخر می بینیم که واکسن ۲۰ درصدی، نمودار توزیع نهایی بهبودیافتگان یا فوت شدگان را کاملاً تغییر داده است و تعداد بیماران را بصورت چشمگیری کاهش داده است.

در مورد قرنطینه نیز همانطور که در شکل ۹ دیده می شود، می توان گفت که هرچه میزان قرنطینه بیشتر باشد اوج بیماری در نقطه ی پائین تری رخ می دهد. همانطور که در این شکل هم دیده می شود میزان قرنطینه سرعت رشد بیماری را نیز کاهش می دهد که این کاهش را می توان در دیر تر به اوج رسیدن بیماری با افزایش میزان قرنطینه مشاهده کرد. نکته جالب در این نمودار آن است که بنظر می رسد از جایی به بعد افزایش میزان قرنطینه تاثیر بسیار اندکی بر روی میزان رشد بیماری دارد به گونه ای که در شکل ۹ دو نمودار  $p_2 = 0.9$  و  $p_2 = 1$  تقریباً بر روی یکدیگر افتاده اند. همچنین همانطور که در شکل ۱۰ هم دیده می شود، تاثیر قرنطینه به اندازه ی واکسیناسیون چشمگیر نیست اما همچنان می توان کاهش تعداد نهایی بهبودیافتگان یا فوت



شدگان را در این شکل مشاهده کرد. به ویژه این تاثیر در بیماری های با احتمال انتقال کمتر مشهود تر است. در شکل ۱۱ نیز می توان این مساله مشاهده کرد. در این شکل هنگامی که به ستون ها از بالا به پائین نگاه می کنیم متوجه می شویم که با افزایش قرنطینه میزان فوت شدگان (بهبود یافتگان) کمتر شده است اما این کاهش در دو ستون آخر بسیار کم تر از دو ستون اول می باشد. با توجه به این توضیحات بنظر می رسد نقش اصلی قرنطینه در کند کردن شیوع بیماری می باشد. این کند شدن شیوع، مجددا سبب می شود که سیستم درمان فشار کمتری را تحمل کنند که به معنای فشار کمتر بر روی کادر درمان و همچنین در دسترس بودن تعداد تخت های بیشتر می باشد که تمام این موارد می تواند منجر به کاهش میزان فوت شدگان در یک سناریو واقعی شود.

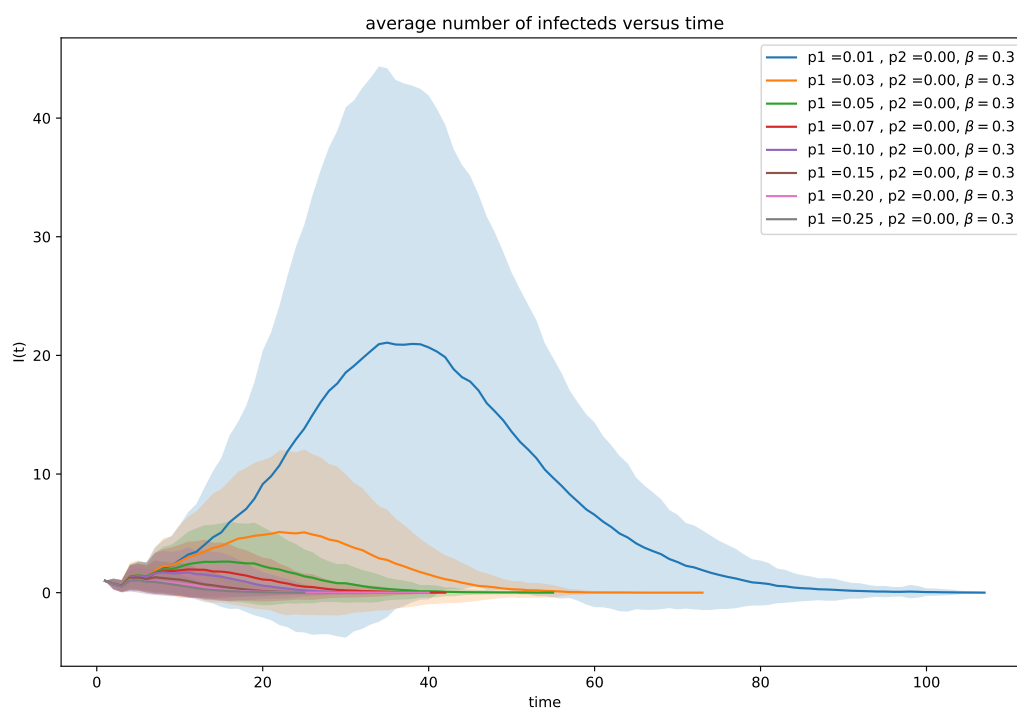
## ۶ ه: تاثیر میانگین درجه رئوس (امتیازی)

در این قسمت تاثیر میانگین درجه رئوس را بر روی شبیه سازی بررسی می کنیم. در قسمت ۱.۶ میانگین درجه رئوس را به ۳ کاهش می دهیم و در قسمت ۲.۶ این عدد را به ۱۲ افزایش می دهیم.

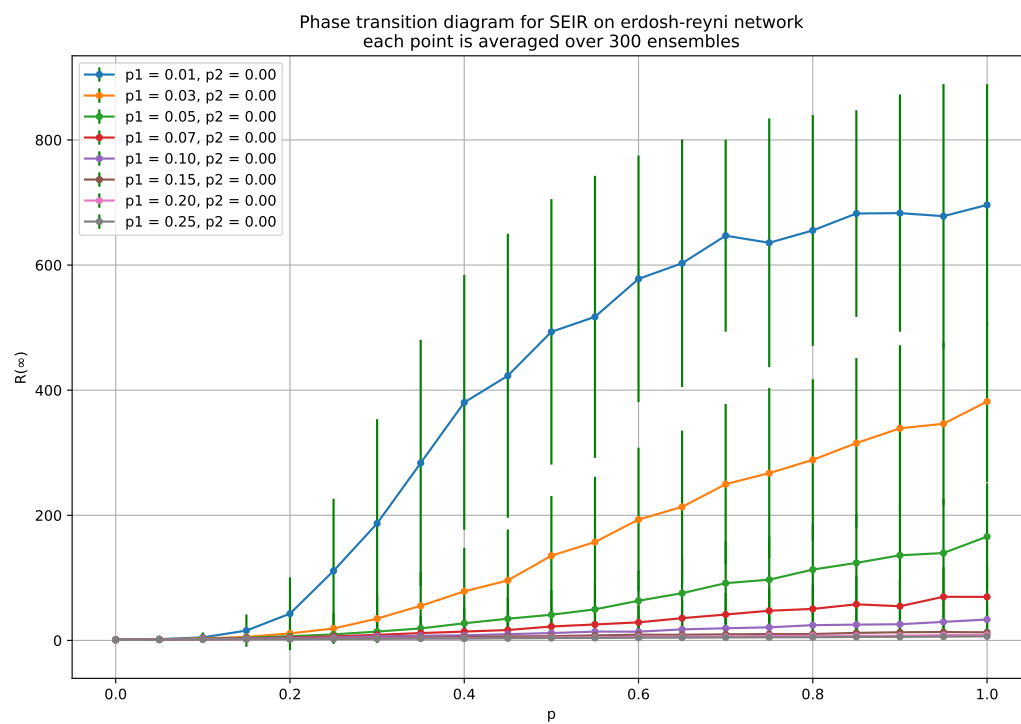
### ۱.۶ درجه راس کمتر

در شکل ۱۲ نمودار گروه بیماران بر حسب زمان را برای چند مقدار مختلف می بینید. در اینجا نیز رفتاری مشابه میانگین راس ۶ می بینیم فقط با این تفاوت که در اینجا به علت کمتر بودن تعداد همسایه ها تعداد مبتلایان بسیار کمتر از حالت پیشین می باشد. در نمودار ۱۳ نمودار تعداد نهایی مبتلایان بر حسب احتمال انتقال بیماری را می بینید. همانطور که دیده می شود واکسیناسیون سبب کاهش تعداد نهایی مبتلایان شده است. همچنین با توجه به کم بودن تعداد همسایگان، تاثیر سرعت بیشتر واکسیناسیون در اینجا مشهود تر است. با توجه به این نمودار تقریباً ۱۰ درصد واکسیناسیون سبب جلوگیری از شیوع بیماری حتی با بالاترین میزان احتمال انتقال شده است. شکل ۱۴ نمودار بافت نگار  $R(\infty)$  برای چند مقدار  $p_1$  و احتمال انتقال بیماری می باشد. نکته جالب توجه در این نمودار در مقایسه با حالت قبلی آن است که به علت کمتر بودن همسایه ها در اینجا رشد بیماری برای احتمال انتقال ۰.۳ نیز همچنان بسیار کم است و درصد کمی از جامعه را درگیر می کند. در نمودار های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نمودار های مربوط به حالت اعمال قرنطینه را مشاهده می کنید. در این جا رفتار کلی مشابه آنچه در قسمت های قبل برای میانگین راس ۶ دیدیم می باشد. نکته ای که در نمودار های ۱۶ و ۱۷ می توان مشاهده کرد، تاثیر بیشتر قرنطینه در این شبکه نسبت به شبکه حالت قبل می باشد. در این نمودار همانطور که دیده می شود با اعمال قرنطینه نسبت به حالت قبلی، از تعداد بهبود یافتگان یا فوت شدگان بیشتر کاسته شده است.

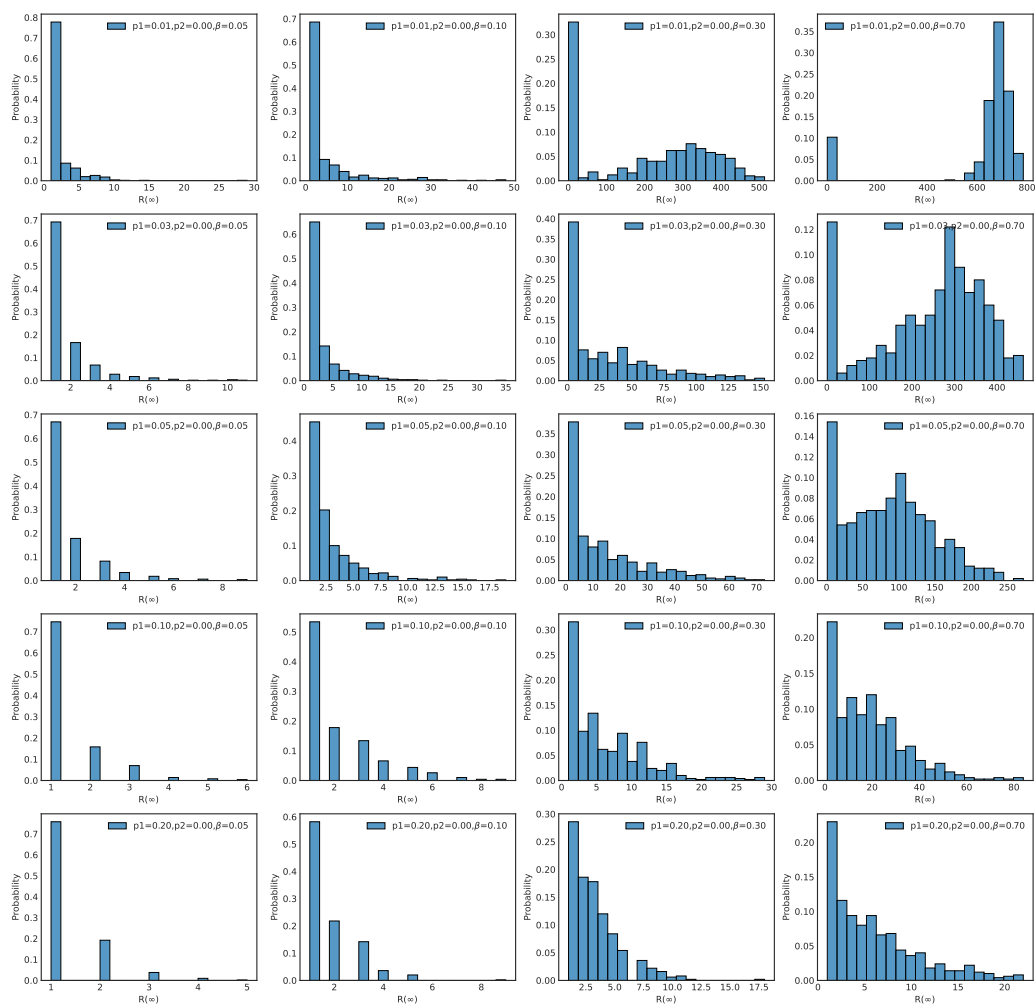
در جدول ۱۸ درصد افراد واکسینه شده را در پایان شیوع مشاهده می کنید.



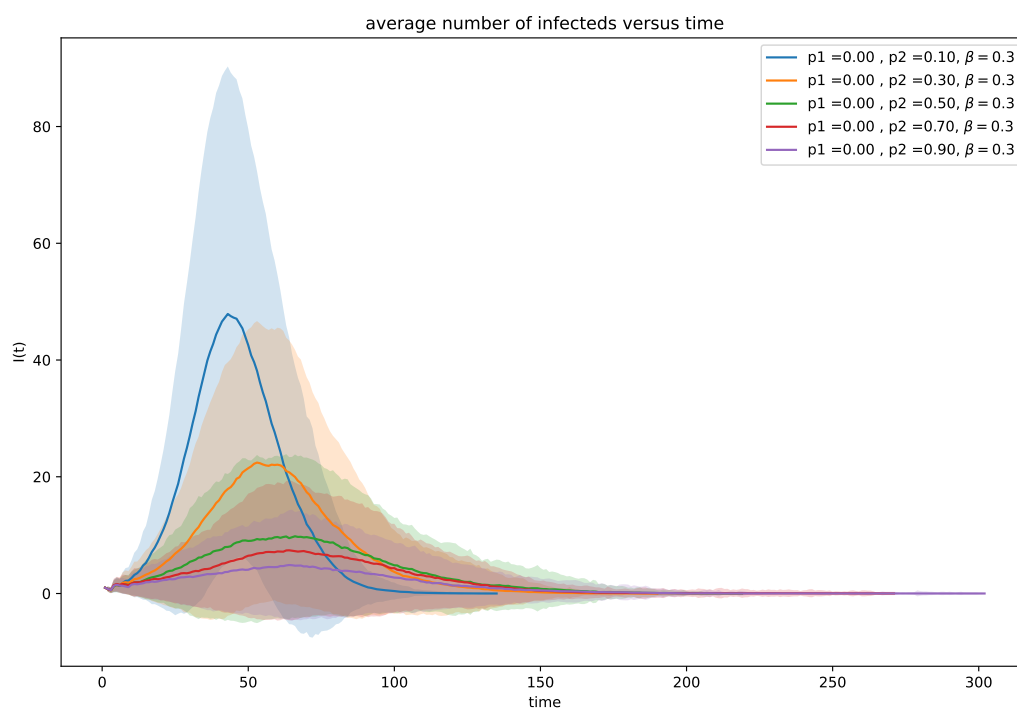
شکل ۱۲: نمودار تعداد افراد بیمار بر حسب زمان برای چند مقدار احتمال انتقال مختلف برای مدل SEIR همراه با واکسیناسیون. احتمال واکسیناسیون برابر  $p_1$  می باشد. میانگین درجه رئوس برابر ۳ می باشد.



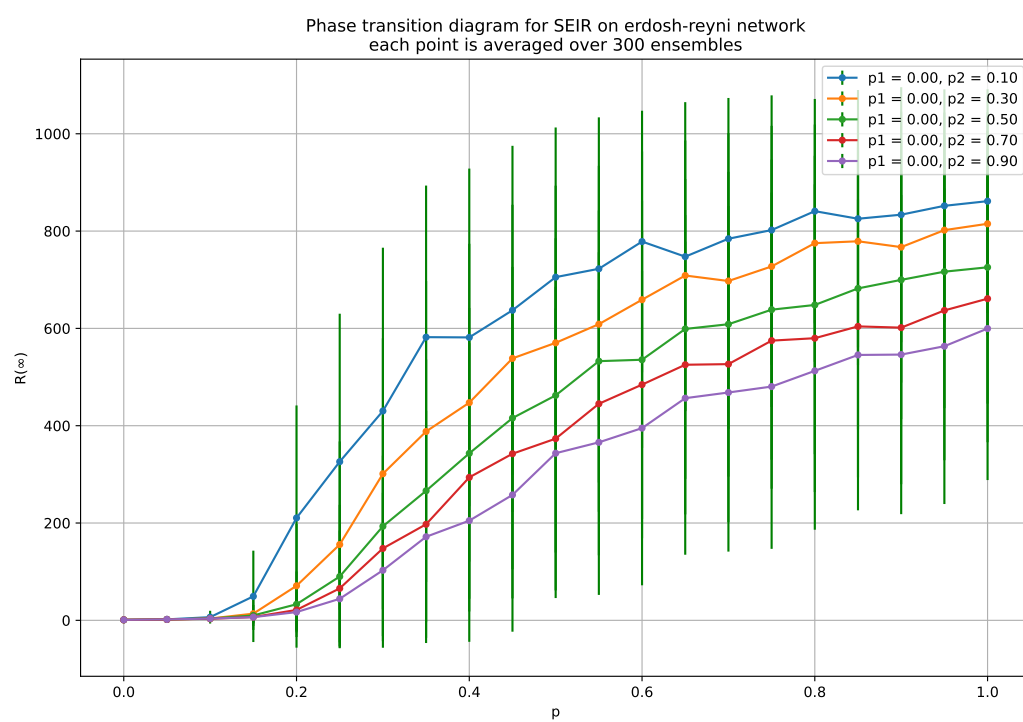
شکل ۱۳: نمودار  $R(\infty)$  برحسب احتمال انتقال بیماری  $p$  برای مقایر مختلف احتمال واکسیناسیون. میانگین درجه رئوس برابر ۳ می باشد.



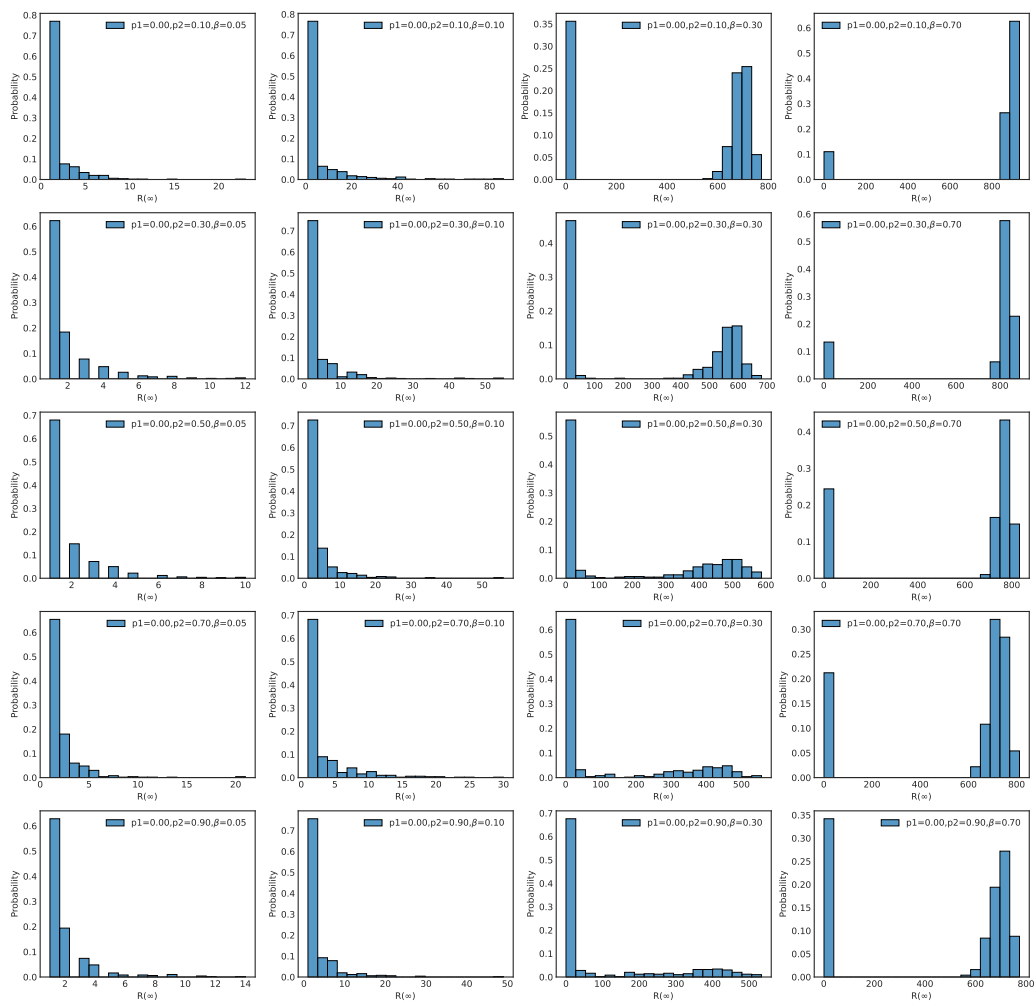
شکل ۱۴: بافت نگار تعداد بهبود یافتگان نهایی برای مدل SEIR با واکسن برای چند مقدار مختلف احتمال انتقال و  $p_1$ . میانگین درجه رئوس ۳ می باشد.



شکل ۱۵: نمودار تعداد بیماران بر حسب زمان برای چند مقدار مختلف  $p_2$ . همانطور که می بینید افزایش احتمال قرنطینه سبب کاهش قله نمودار و دیرتر رخ دادن اوج شیوع می شود. میانگین درجه رئوس ۳ می باشد.



شکل ۱۶: نمودار  $R(\infty)$  برحسب احتمال انتقال بیماری برای چند مقدار مختلف  $p_2$ . میانگین درجه رئوس برابر ۳ می باشد.

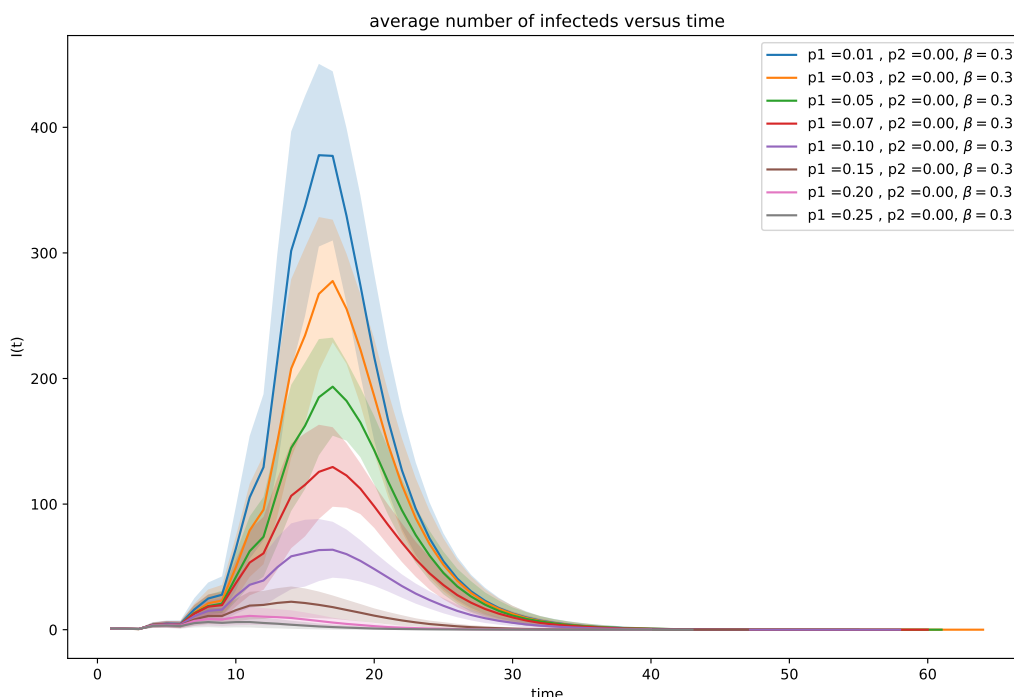


شکل ۱۷: بافت نگار  $R(\infty)$  برای چند مقدار مختلف  $p_2$  و احتمال انتقال بیماری  $\beta$ . میانگین درجه رئوس ۳ می باشد.

percentage vaccinated	
p1=0.01,beta=0.05	0.067820
p1=0.01,beta=0.10	0.067820
p1=0.01,beta=0.30	0.067820
p1=0.01,beta=0.70	0.067820
p1=0.03,beta=0.05	0.097747
p1=0.03,beta=0.10	0.097747
p1=0.03,beta=0.30	0.097747
p1=0.03,beta=0.70	0.097747
p1=0.05,beta=0.05	0.295953
p1=0.05,beta=0.10	0.295953
p1=0.05,beta=0.30	0.295953
p1=0.05,beta=0.70	0.295953
p1=0.1,beta=0.05	0.217347
p1=0.1,beta=0.10	0.217347
p1=0.1,beta=0.30	0.217347
p1=0.1,beta=0.70	0.217347
p1=0.2,beta=0.05	0.163973
p1=0.2,beta=0.10	0.163973
p1=0.2,beta=0.30	0.163973
p1=0.2,beta=0.70	0.163973

شکل ۱۸: جدول درصد افراد واکسینه شده در پایان شیوع. میانگین درجه رئوس ۳ می باشد.

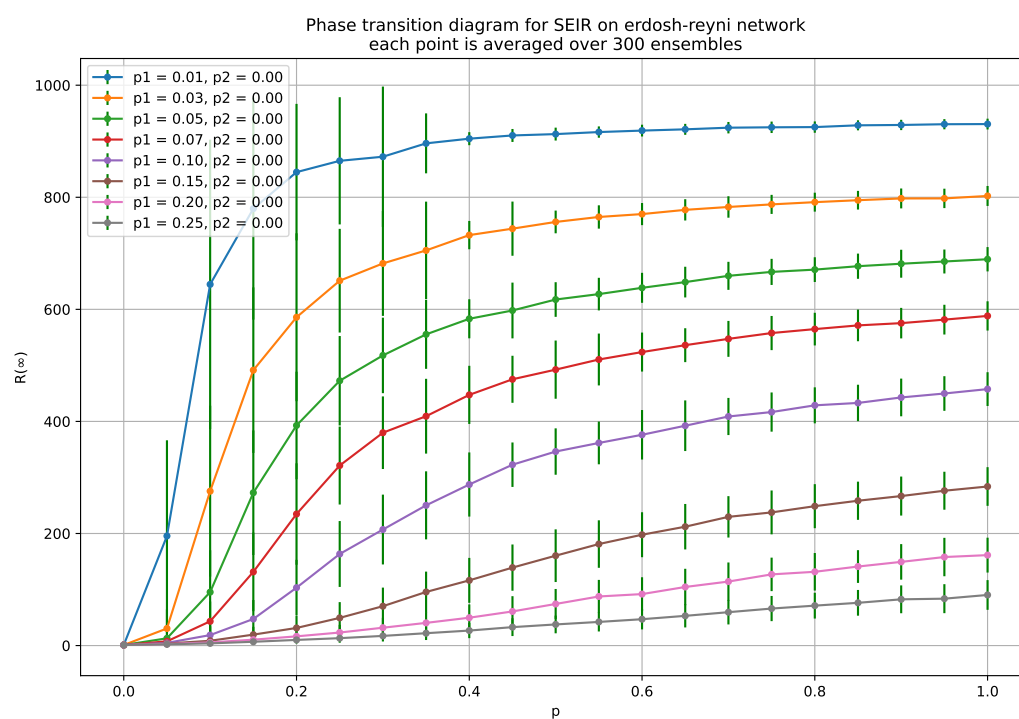




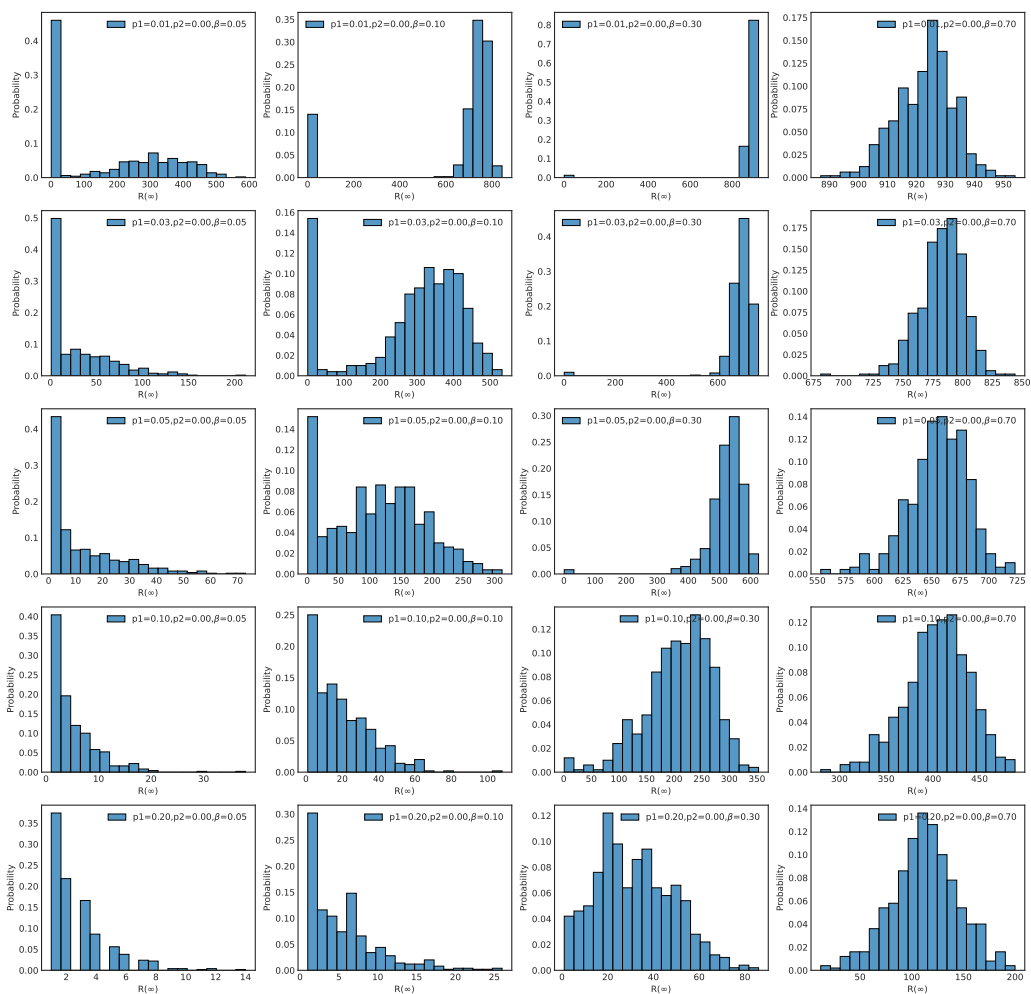
شکل ۱۹: نمودار تعداد افراد بیمار بر حسب زمان برای چند مقدار احتمال انتقال مختلف برای مدل SEIR همراه با واکسیناسیون. احتمال واکسیناسیون برابر  $p_1$  می باشد. میانگین درجه رئوس برابر ۱۲ می باشد.

## ۲.۶ درجه راس بیشتر

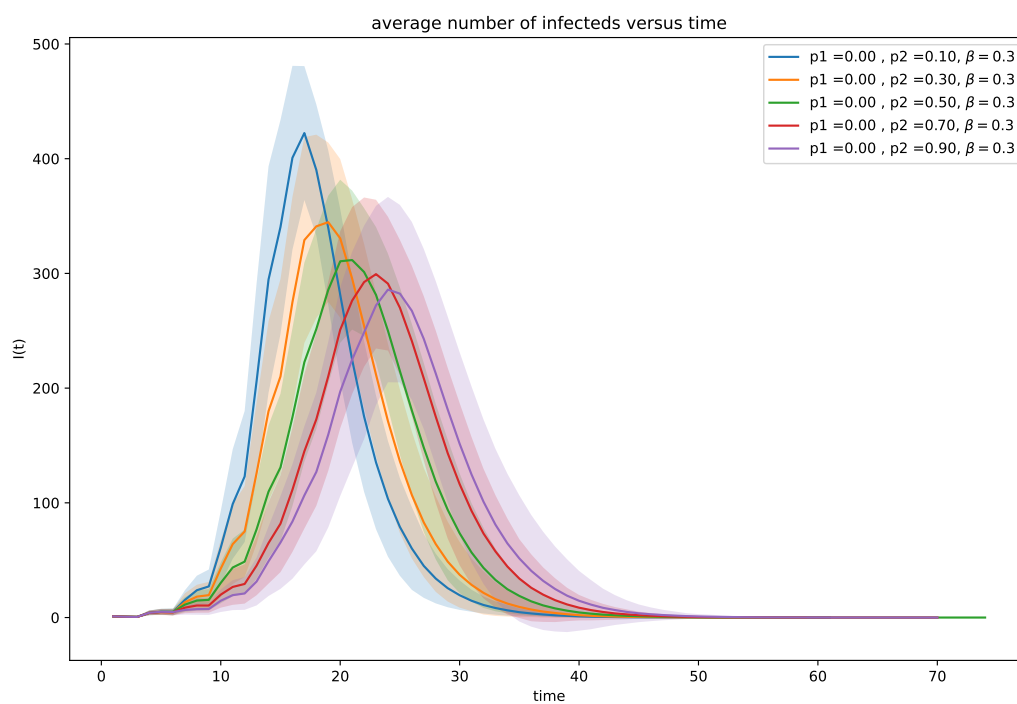
در شکل های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نمودار های مربوط به حالتی که واکسیناسیون را اعمال می کنیم می بینید. در اینجا نیز رفتار کلی مشابه رفتاری است که برای میانگین راس ۶ مشاهده کردیم. اما در اینجا به علت بیشتر بودن تعداد همسایه های رئوس، مقدار قله ی شیوع از حالت های مشابه قبلی بیشتر است. همچنین بنظر می رسد که نقطه تغییر فاز برای این شبکه در مقادیر کمتر از 0.1 برای احتمال انتقال بیماری رخ می دهد. نکته ای که می توان در نمودار ۲۱ در مقایسه با نمودار مشابه با میانگین درجه ۶ مشاهده کرد آن است که در اینجا علرغم وجود واکسن همچنان بیماری به مقدار قابل توجهی در جامعه رشد می کند که این امر به علت بیشتر بودن تماس افراد با یکدیگر در نمودار های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ نمودار های مربوط به اعمال قرنطینه را می بینید. در اینجا نیز رفتار کلی مشابه شبکه ای با میانگین درجه راس ۶ می باشد با این تفاوت که در همانطور که در شکل های ۲۳ و ۲۴ دیده می شود، تاثیر قرنطینه بر مهار بیماری در این شبکه بسیار ناچیز است و جز در مواردی که احتمال انتقال بیماری اندک است، تاثیرش قابل چشم پوشی است. بنابراین بنظر می رسد در چنین شبکه ای استفاده از واکسن می تواند استراتژی بهتری برای کنترل بیماری باشد.



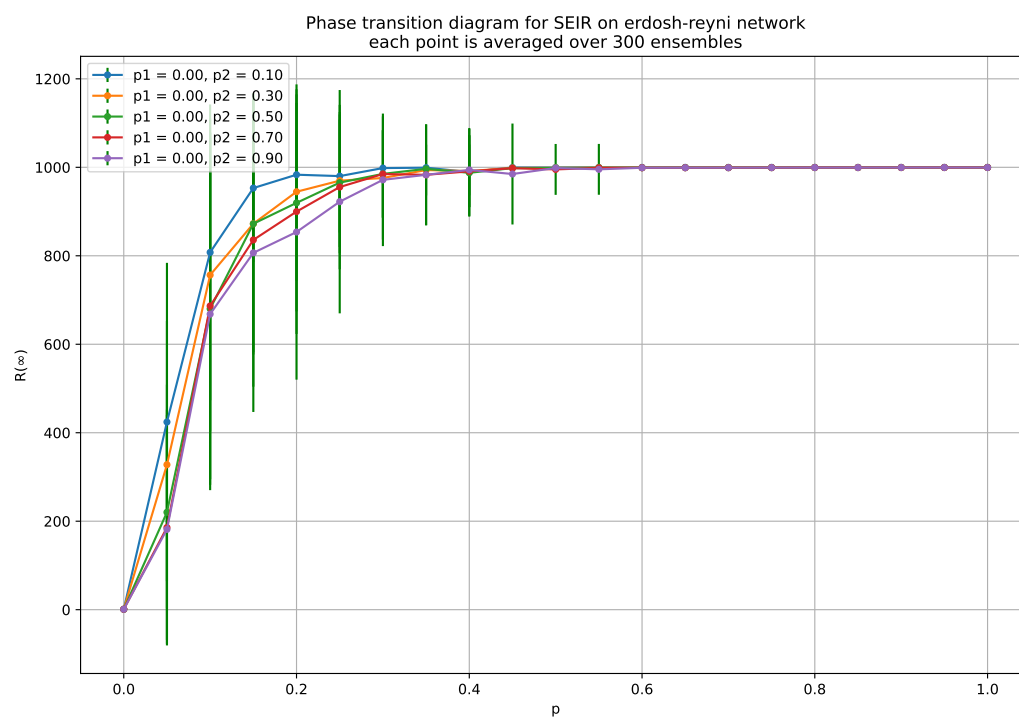
شکل ۲۰: نمودار  $R(\infty)$  برحسب احتمال انتقال بیماری  $p$  برای مقایسه مختلف احتمال واکسیناسیون. میانگین درجه رئوس برابر ۱۲ می باشد.



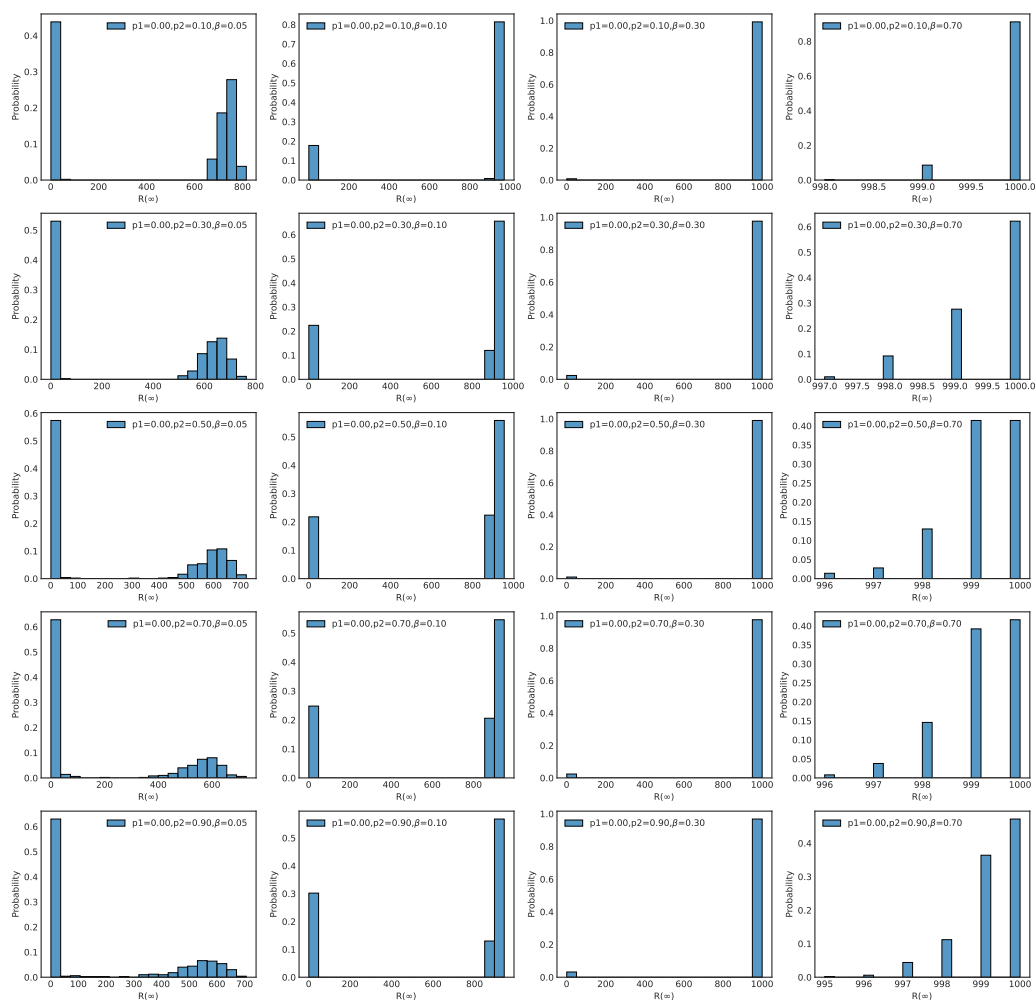
شکل ۲۱: بافت نگار تعداد بهبود یافتگان نهایی برای مدل SEIR با واکسن برای چند مقدار مختلف احتمال انتقال و  $p_1$ . میانگین درجه رئوس ۱۲ می باشد.



شکل ۲۲: نمودار تعداد بیماران بر حسب زمان برای چند مقدار مختلف  $p_2$ . همانطور که می بینید افزایش احتمال قرنطینه سبب کاهش قله نمودار و دیرتر رخ دادن اوج شیوع می شود. میانگین درجه رئوس ۱۲ می باشد.



شکل ۲۳: نمودار  $R(\infty)$  بر حسب احتمال انتقال بیماری برای چند مقدار مختلف  $p_2$ . میانگین درجه رئوس برابر ۱۲ می باشد.



شکل ۲۴: بافت نگار  $R(\infty)$  برای چند مقدار مختلف  $p_2$  و احتمال انتقال بیماری  $\beta$ . میانگین درجه رئوس ۱۲ می باشد.

در جدول ۲۵ درصد افراد واکسینه شده را در پایان شیوع مشاهده می کنید.

	percentage vaccinated
$p1=0.01, \text{beta}=0.05$	0.311667
$p1=0.01, \text{beta}=0.10$	0.311667
$p1=0.01, \text{beta}=0.30$	0.311667
$p1=0.01, \text{beta}=0.70$	0.311667
$p1=0.03, \text{beta}=0.05$	0.190363
$p1=0.03, \text{beta}=0.10$	0.190363
$p1=0.03, \text{beta}=0.30$	0.190363
$p1=0.03, \text{beta}=0.70$	0.190363
$p1=0.05, \text{beta}=0.05$	0.107253
$p1=0.05, \text{beta}=0.10$	0.107253
$p1=0.05, \text{beta}=0.30$	0.107253
$p1=0.05, \text{beta}=0.70$	0.107253
$p1=0.1, \text{beta}=0.05$	0.075787
$p1=0.1, \text{beta}=0.10$	0.075787
$p1=0.1, \text{beta}=0.30$	0.075787
$p1=0.1, \text{beta}=0.70$	0.075787
$p1=0.2, \text{beta}=0.05$	0.476747
$p1=0.2, \text{beta}=0.10$	0.476747
$p1=0.2, \text{beta}=0.30$	0.476747
$p1=0.2, \text{beta}=0.70$	0.476747

شکل ۲۵: جدول درصد افراد واکسینه شده در پایان شیوع. میانگین درجه رئوس ۱۲ می باشد.

- [1] Keeling, Matt J. and Rohani, Pejman. *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*. Princeton University Press, September 2011.
- [2] Hagberg, Aric A., Schult, Daniel A., and Swart, Pieter J. Exploring network structure, dynamics, and function using networkx. in Varoquaux, Gaël, Vaught, Travis, and Millman, Jarrod, eds. , *Proceedings of the 7th Python in Science Conference*, pp. 11 – 15, Pasadena, CA USA, 2008.