

طراحی و پیاده سازی یک کنترلر مدل پیش بین برای مهار انتشار کووید-۱۹ در ایران

مهدی رضائی بهر مند^۱، حمید خالوزاده^۲، پرستو ریحانی اردبیلی^۳

^۱دانشجوی دکتری، گروه ریاضی، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی، ۹۹۳۱-۲۳۹۳۱، تهران، ایران، RezaeiMahdi2018@gmail.com

^۲استاد، گروه کنترل، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، h_khaloozadeh@kntu.ac.ir

^۳استادیار، گروه ریاضی، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی، ۹۹۳۱-۲۳۹۳۱، تهران، ایران، P_reihani@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۱۱/۰۹، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۹/۱۱/۲۴

چکیده: در این مقاله به منظور مهار انتشار بیماری کووید-۱۹ مبتنی بر اعمال سطوح مختلف محدودیت‌های اجتماعی، یک مدل پیشنهاد شده است. همچنین، یک الگوریتم ژنتیک پارامترهای مدل را با استفاده از داده‌های واقعی گزارش شده از سوی وزارت بهداشت ایران و داده‌های شبیه سازی شده بر مبنای مدل پیشنهادی، شناسایی می‌کند. از آنجایی که کنترل مدل پیش بین یک روش محبوب است که به طور گسترده‌ای در کنترل فرآیندها مورد استفاده قرار گرفته است، پس از گسسته سازی مدل با یک روش مرسوم مانند اویلر، می‌توانیم محدودیت‌های مناسب را در نظر بگیریم و مسئله بهینه سازی آنلاین را حل نماییم. ما در این مقاله نشان داده‌ایم که کنترلر مدل پیش بین قادر است نمودار مبتلایان به کووید-۱۹ را با اعمال سطوح مختلف محدودیت‌های اجتماعی، پهن کند و اوج آن را کاهش دهد. مثال عددی و نتایج شبیه سازی، مبتنی بر داده‌های واقعی به منظور نشان دادن قابلیت این روش آورده شده است.

کلمات کلیدی: کنترل مدل پیش بین، شناسایی سیستم، الگوریتم ژنتیک، کووید-۱۹.

Design and implementation of a model predictive controller for the COVID-19 spread restraint in Iran

Mahdi Rezaei Bahrmand, Hamid Khaloozadeh, Parastoo Reihani Ardabili

Abstract: In this paper, a model is proposed based on the different levels of social restrictions for the COVID-19 spread restraint in Iran. Also, a Genetic Algorithm (GA) identifies parameters of model using reported main data from the Iranian Ministry of Health and simulated data based on proposed model. Whereas Model Predictive Control (MPC) is a popular method which has been widely used in process control, after the discretization of model by a common method like Euler method, then we can consider the appropriate constraints and solve online optimization problem. In this paper, we have shown that the MPC controller able to flatten infected (symptomatic) individual curve and decrease its peak by applying the different levels of social restrictions. Numerical example and simulation results, based on main data, are given to illustrate the capability of this method.

Keywords: Model Predictive Control, System identification, GA algorithm, COVID-19.

۱- مقدمه

در دهه های اخیر، الگوریتم‌های مختلف کنترل مدل پیش‌بین به عنوان یک رویه کنترلی پیشرفته، در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند. استفاده از مفاهیم اولیه کنترل در طراحی، تنظیم ساده کنترل-کننده، قابلیت توسعه آسان برای سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی، سهولت در پیاده‌سازی قانون کنترل، در نظر گرفتن محدودیت‌های سیگنال کنترل، خروجی و حالت در فرآیند طراحی از مزایای مناسب این رویه به شمار می‌روند [۱]. از طرفی همواره مسئله کنترل و مهار یک بیماری به عنوان یک پدیده زیستی، مسئله ای جذاب به نظر می‌رسد. اکنون نیز خطر رخداد یک فاجعه انسانی، با گسترش ویروس کووید-۱۹، به عنوان یک تهدید جهانی برای سلامت بشر کاملاً مشهود است. دانشمندان نخستین بار اعلام این ویروس را در دسامبر ۲۰۱۹، که موجب یک سندروم حاد تنفسی که به صورت بالقوه کشنده است، در شهر ووهان کشور چین به عنوان ویروس سارس- کووید-۲ شناسایی نمودند. سازمان بهداشت جهانی در انتهای ماه مارس ۲۰۱۹، تعداد موارد تایید شده ابتلا را ۷۰۰۰۰ نفر با تعداد مرگ بیش از ۳۳۰۰۰ تخمین زد. اکنون پس از گذشت بیش از یکسال، در اواسط فوریه ۲۰۲۱، این بیماری تقریباً در تمامی کشورهای جهان شیوع یافته است که موارد ابتلا به بیش از ۱۰۹ میلیون نفر و جان باختگان ناشی از ابتلا به این بیماری بیش از ۲۴۰۰۰۰ نفر می‌باشد [۲] و [۳].

برای روشن تر شدن اهمیت ارائه راهکاری عملی به منظور مهار بیماری کووید-۱۹، به مرور برخی نظرات در پژوهش‌های اخیر می‌پردازیم. تعداد زیادی از پژوهشگران بر یافتن راهکاری عملی در پژوهش‌های اخیر بر تلاش و کوشش از طریق به کارگیری دانش جهانی به منظور جلوگیری از گسترش بیماری کووید-۱۹ تاکید نموده‌اند [۴]. بررسی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که همچنان به دلیل عدم تکمیل روند تزریق واکسن به صورت همگانی و اینکه تولید واکسن هنوز در گام‌های آزمایشی خود به سر می‌برد، استفاده از ابزار محدودیت اجتماعی گزینه ای اجباری اما مناسب می‌باشد [۵] و [۶]. البته تعیین نوع محدودیت‌های اجتماعی و تشخیص چگونگی اعمال محدودیت‌ها از لحاظ استمرار و شدت، به عنوان یک چالش جدی برای دولت‌ها به شمار می‌رود، که ایران نیز از این قاعده مستثنی نیست. در بین پژوهش‌های یاد شده، بحث در مورد انتخاب راهکار بهینه در خصوص اعمال محدودیت‌های اجتماعی و ملحوظ داشتن قیود کنترلی مرتبط با آن کمتر پرداخته شده است. به عنوان مثال یکی از قیود مهم در کنترل انتشار بیماری کووید-۱۹، کمبود امکانات درمانی نظیر تخت‌های مراقبت‌های ویژه در بیمارستان‌ها است و به نظر می‌رسد یکی از دلایل اصلی قراردادن محدودیت‌های اجتماعی همین مطلب باشد [۷]. همچنین نویسندگان در [۸]، [۹]، [۱۰] و [۱۱] دریافتند که، تعیین زمان مناسب در اعمال محدودیت‌ها به کاهش تعداد بستری‌ها و اشغال تخت‌های مراقبت‌های ویژه کمک بسیاری می‌کند. همچنین اعمال بی‌رویه اقدامات

و محدودیت‌های اجتماعی سختگیرانه، باعث بروز تاثیرات مخرب اقتصادی در آینده آن کشور خواهد بود. از طرفی، ممکن است در اثر اعمال محدودیت‌های اجتماعی، برای قسمتی از جامعه ایمن‌سازی انجام نشود و در پی آن موج بعدی ابتلا به کووید-۱۹ ایجاد گردد و در فصول سرد همه گیری آن مکرر رخ بدهد. همچنین، طبق بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله، در مورد انتشار اکثر بیماری‌های همه گیر در پیشینه‌های تحقیقاتی نظیر [۱۲]، [۱۳]، [۱۴] و [۱۵] ردپای استفاده از روش‌های کنترل کلاسیک بیش از سایر روش‌ها نمایان است. با وجود مزایای مناسب رویه کنترل مدل پیش‌بین، تنها در تعداد محدودی از پژوهش‌ها مانند [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] از این رویکرد یا از روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری [۱۹] استفاده شده است. از طرفی استفاده بی‌رویه از اعمال محدودیت‌های اجتماعی، بدون در نظر گرفتن تبعات نامطلوب اجتماعی، اقتصادی، روانی آن، راهکاری واقع‌بینانه و قطعی نخواهد بود. لذا انگیزه‌های اشاره شده ما را بر آن داشت، تا نسبت به توسعه استفاده از کنترل مدل پیش‌بین در کارهای محدود انجام شده، گام برداریم و ضمن استفاده از این روش پرکاربرد، به ارائه یک مدل پیشنهادی نیز پردازیم.

ساختار کلی بخش‌های مقاله حاضر بدین گونه است که پس از بخش مقدمه، در بخش دوم به معرفی یک مدل انتشار برای بیماری کووید-۱۹ پرداخته‌ایم. از آنجا که برای استفاده از کنترل مدل پیش‌بین نیازمند به مدل فرآیند مورد بررسی هستیم، در بخش سوم، یک مدل برای مهار انتشار بیماری کووید-۱۹ با توجه به سطح بندی محدودیت‌های اجتماعی پیشنهاد شده است. در بخش چهارم، یک مسئله کنترل پیش‌بین برای مهار انتشار بیماری بیان شده است. در بخش پنجم، مثال عددی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، رویه شناسایی پارامترهای مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تاثیرات اعمال کنترل‌گر مبتنی بر مدل پیش‌بین مبتنی بر داده‌های واقعی ارائه شده است. همچنین در بخش ششم، نتیجه گیری بیان می‌گردد.

۲- معرفی یک مدل انتشار برای بیماری کووید-۱۹

۱۹

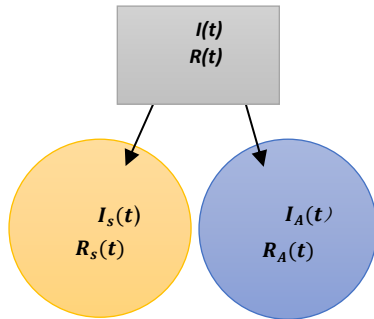
بررسی برخی تحقیقات مختلف، نشان می‌دهد که توصیف رفتار ویروس کووید-۱۹ می‌تواند تا حد زیادی در قالب مدل، مشکوک-مبتلا-بهبودیافته (SIR)، توصیف شود [۶]، [۲۰] و [۲۱]. با در نظر گرفتن تعداد فوت شدگان، مدل بهبود یافته دیگری به صورت مشکوک-مبتلا-بهبودیافته-فوت شدگان (SIRD) نامیده می‌شود نیز، در مورد بیماری‌های همه گیر مطرح است [۲۲]. همچنین، با جدا سازی هر یک از رده‌های مبتلایان و بهبود یافتگان به دو رده علامت دار و بدون علامت، همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک مدل با جزئیات بیشتر با عنوان مشکوک-مبتلا-بهبودیافته-فوت شدگان-بدون علامت-دارای علامت ۳ (SIRDASD) مطرح گردید که در مدلسازی و توصیف رفتار انتشار برخی از ویروس‌های همه گیر به ویژه ویروس سارس- کووید-۲، دارای اهمیت

³Susceptible-Infected-Recovered-Asymptomatic- Symptomatic-Dead¹Susceptible-Infected-Recovered
²Susceptible-Infected-Recovered-Dead

حال چون با در نظر گرفتن متغیر فوت ناشی از بیماری، تعداد افراد جمعیت در اثر ابتلا کاهش پیدا می کند، داریم:

$$\frac{dN}{dt}(t) = -\frac{\rho}{1-\rho}\gamma I(t) \quad (1)$$

همچنین اگر متغیر $I(t)$ به صورت زیر به دو رده زیر تفکیک شود، داریم:



شکل ۱) تفکیک افراد مبتلا و بهبود یافته به رده علامت دار و بدون علامت

لذا طبق توضیحات فوق، مدل مشکوک-مبتلا-بهبود یافته-فوت شدگان-بدون علامت-دارای علامت را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt}(t) &= -(\beta_A I_A(t) + \beta_S I_S(t)) \frac{S(t)}{N(t)} \\ \frac{dI_A}{dt}(t) &= (1-p)(\beta_A I_A(t) + \beta_S I_S(t)) \frac{S(t)}{N(t)} - \gamma_A I_A(t) \\ \frac{dI_S}{dt}(t) &= p(\beta_A I_A(t) + \beta_S I_S(t)) \frac{S(t)}{N(t)} - \frac{\gamma_S I_S(t)}{1-\rho} \\ \frac{dR_A}{dt}(t) &= \gamma_A I_A(t) \\ \frac{dR_S}{dt}(t) &= \gamma_S I_S(t) \\ \frac{dD}{dt}(t) &= \frac{\rho}{1-\rho} \gamma_S I_S(t) \end{aligned} \quad (2)$$

که در بخش ۵ در مورد شبیه سازی این مدل به تفصیل به بحث و توضیح پرداخته شده است.

می باشد [۲۳] و [۲۴]. که در اینجا به دلیل جامع تر بودن این مدل به بیان آن می پردازیم.

۲-۱ مدل سازی بیماری کووید-۱۹ با استفاده از مدل SIRDASD

ابتدا توجه می کنیم که مدل SIRDASD دارای متغیرها و پارامترهای می باشد که توصیف آن ها به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ آمده است:

جدول ۱: توصیف متغیرهای مدل SIRDASD

متغیر	تعریف متغیر
$S(t)$	تعداد افراد مشکوک در لحظه t
$I(t)$	تعداد افراد مبتلا در لحظه t
$R(t)$	تعداد افراد بهبود یافته در لحظه t
$D(t)$	تعداد افراد فوت شده در لحظه t
$N(t)$	مجموع تعداد افراد مشکوک، مبتلا و بهبود یافته در هر لحظه t
$I_S(t)$	تعداد افراد مبتلای علامت دار در لحظه t
$I_A(t)$	تعداد افراد مبتلای بدون علامت در لحظه t
$R_S(t)$	تعداد افراد بهبود یافته علامت دار در لحظه t
$R_A(t)$	تعداد افراد بهبود یافته بدون علامت در لحظه t

همچنین توصیف پارامترهای مدل SIRDASD و عبارات مشمول در آن، در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲: توصیف پارامترهای مدل SIRDASD

پارامتر	توصیف پارامتر	شرح عبارت مربوط به پارامتر مشمول در مدل در هر واحد زمان
β	میانگین تعداد کمیته تماس ها جهت انتقال ویروس در هر واحد از زمان	$\beta I(t)S(t)/N(t)$ تعداد کمیته تماس ها جهت انتقال ویروس به فرد مشکوک
ρ	میزان احتمال اینکه فرد قبل از بهبودی فوت کند	$\frac{\rho}{1-\rho}\gamma I(t)$ تعداد افرادی از جمعیت که در هر واحد زمان فوت می کنند
γ	نرخ بهبود یا فوت	
p	احتمال ابتلا به صورت دارای علامت	

۳- مدل پیشنهادی برای مهار انتشار بیماری کووید-۱۹

به منظور طراحی یک استراتژی کنترلی موثر جهت اعمال سیاست‌های دولتی محدودیت‌های اجتماعی مدل SIRASD باید به گونه‌ای با تصمیمات ستاد مبارزه با کرونا، منطبق گردد. بنابراین یک معادله دیفرانسیل جدید که توصیفی از پاسخ جمعیت به این سیاست‌های کنترلی باشد را معرفی می‌کنیم که در آن چهار حالت برای محدودیت‌ها متصور هستیم، که عبارتند از: ۱- بدون اعمال محدودیت ۲- محدودیت خفیف ۳- محدودیت متوسط ۴- محدودیت شدید (اعم از تعطیلی گروه‌های شغلی مختلف، محدود نمودن ساعات آمد و شد، عدم منع عبور و مرور شهری و بین شهری و غیره). همچنین $\varphi(t)$ پاسخ به این محدودیت‌ها از طرف جامعه می‌باشد، اگر $\varphi(t) = 0$ باشد یعنی تعطیلی کامل انجام شده است. $\varphi(t) = K\varphi^l(t)\varphi^l$ که در آن l نشان‌دهنده اعمال محدودیت‌های سطوح اول، دوم و سوم یعنی خفیف، متوسط و شدید ۶ می‌باشد. همچنین منظور از سطح بدون محدودیت ۷، زمانی است که دولت تشخیص می‌دهد که به هیچگونه محدودیت اجتماعی نیاز نیست. لذا $\varphi(t) = 3$ به معنای برقراری یک شرایط معمولی بدون تعطیلی مانند قبل از شیوع بیماری است. یعنی اگر فرض کنیم $u_1(t)$ ، $u_2(t)$ و $u_3(t)$ ، به ترتیب متغیرهای تصمیم در مورد اعمال محدودیت سطوح اول، دوم و سوم (خفیف، متوسط، شدید) باشند، معادله دیفرانسیل توصیف کننده پاسخ جمعیتی ۸ (RPDF) نامیده می‌شود، به صورت رابطه (۳) زیر می‌باشد:

$$\frac{d\varphi}{dt}(t) = \begin{cases} \alpha^{Normal}(\varphi - \varphi(t)) & u_1(t) = u_2(t) = u_3(t) = 0 \\ \alpha^{Mild}(K_{\varphi}^{Mild}(t)\varphi^{Mild} - \varphi(t)) & u_1(t) = 1; u_2(t) = u_3(t) = 0 \\ \alpha^{Mod}(K_{\varphi}^{Moderate}(t)\varphi^{Moderate} - \varphi(t)) & u_2(t) = u_3(t) = 1; u_1(t) = 0 \\ \alpha^{hard}(K_{\varphi}^{hard}(t)\varphi^{hard} - \varphi(t)) & u_2(t) = u_3(t) = 1; u_1(t) = 1 \end{cases}$$

با توجه به مقادیر $u_i(t)$ ها، سطوح $l = 1, 2, 3$ را به صورت زیر داریم:

$$l = 1 \Rightarrow u_1(t) = 1; u_2(t) = u_3(t) = 0 \Rightarrow u_r(t) = 1$$

$$l = 2 \Rightarrow u_2(t) = u_3(t) = 1; u_1(t) = 0 \Rightarrow u_r(t) + u_1(t) = 2 \quad (4)$$

$$l = 3 \Rightarrow u_3(t) = u_2(t) = u_1(t) = 1 \Rightarrow u_r(t) + u_2(t) + u_1(t) = 3$$

گزاره ۱- فرض کنیم $u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t)$ و محدودیت‌های (۴) به نوعی دارای سطح بندی باشند که اگر هر محدودیت ارضا شود، محدودیت‌های قبل از آن هم ارضا شوند ولی عکس آن برقرار نباشد، آنگاه $u(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$

اثبات- به وضوح اگر هیچیک از سطوح محدودیت‌های (۴) برقرار نباشد، $l = 0$ است و نتیجه می‌دهد $u(t) = 0$. از طرفی با توجه به مفروضات گزاره، در صورتی که اعمال محدودیت هر سطح، محدودیت‌های سطوح بعدی اعمال نشده باقی می‌مانند، پس همواره از بین ۳ محدودیت بالا انتظار داریم با ترتیب ۱ تا ۳، حداقل یک محدودیت اعمال شود، بنابراین با در نظر گرفتن رابطه $l = a_1u_1(t) + a_2u_2(t) + a_3u_3(t)$ به ازای l های مختلف طبق جدول ۳، مقادیر $u(t)$ دارای مقادیر ۱، ۲ یا ۳ است:

جدول ۳. مقدار $u(t)$ و ضرایب $a_i = 1, 2, 3$ ، به ازای سطوح مختلف l

$l = 1$	$a_i = \delta_{in+1}$	$u(t) = 1$
$l = 2$	$a_i = \delta_{in+1} + \delta_{in}$	$u(t) = 2$
$l = 3$	$a_i = \delta_{in} + \delta_{in-1} + \delta_{in-2}$	$u(t) = 3$

که در آن δ_{ij} دلتای کرونکر با تعریف مرسوم می‌باشد. ■

در واقع $u(t)$ معرفی شده در گزاره قبل سیاست‌های اعمال محدودیت‌های اجتماعی تنظیمی دولت را مشخص می‌کند، لذا مدل پیشنهادی که ورودی کنترل نیز در آن لحاظ شده است، مدل SIRASD مقید ۹ نامیده می‌شود، به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt}(t) &= -\varphi(t)(\beta_A I_A(t) + \beta_S I_S(t)) \frac{S(t)}{N(t)} \\ \frac{dI_A}{dt}(t) &= (1-p)\varphi(t)(\beta_A I_A(t) + \beta_S I_S(t)) \frac{S(t)}{N(t)} - \gamma_A I_A(t) \\ \frac{dI_S}{dt}(t) &= p\varphi(t)(\beta_A I_A(t) + \beta_S I_S(t)) \frac{S(t)}{N(t)} - \frac{\gamma_S I_S(t)}{1-\rho} \\ \frac{dR_A}{dt}(t) &= \gamma_A I_A(t) \quad (5) \\ \frac{dR_S}{dt}(t) &= \gamma_S I_S(t) \\ \frac{dD}{dt}(t) &= \frac{\rho}{1-\rho} \gamma_S I_S(t) \\ \frac{d\varphi}{dt}(t) &= \delta_{1n} \alpha^{Normal}(\varphi - \varphi(t))(1 - u(t)) \\ &\quad + \delta_{2n} \alpha^{Mild}(K_{\varphi}^{Mild}(t)\varphi^{Mild} - \varphi(t))u(t) \\ &\quad + \delta_{rn} \alpha^{Moderate}(K_{\varphi}^{Moderate}(t)\varphi^{Moderate} - \varphi(t))u(t) \\ &\quad + \delta_{rn} \alpha^{hard}(K_{\varphi}^{hard}(t)\varphi^{hard} - \varphi(t))u(t) \\ &\quad + \delta_{1n} K_{\varphi}(t)^{Mild} + \delta_{1n} K_{\varphi}(t)^{Moderate} + \delta_{rn} K_{\varphi}(t)^{hard} \\ &= 1 - n\gamma_{intensity} \gamma \frac{\rho}{1-\rho} \frac{I(t)}{N(t)} \end{aligned}$$

⁷Normal
⁸Response of Population-Differential Equation
⁹SIRASD-Constrained

⁴Mild
⁵Moderate
⁶Hard

۴- بیان مسئله کنترل مدل پیش‌بین برای مهار انتشار کووید-۱۹

از آنجا که مراجع بسیار مفید و مشهوری در زمینه آشنایی با کنترلر مدل پیش‌بین وجود دارد، خواننده می‌تواند به [۱] و [۲۵] مراجعه نماید. چنانکه در بخش‌های قبل ذکر شد، اعمال محدودیت‌های اجتماعی در مهار انتشار بیماری کووید-۱۹ امری بدیهی و ضروری می‌باشد [۲۶]، زیرا همانطور که در ادامه خواهیم دید، اعمال سطوح مختلف این محدودیت‌ها، دارای توانمندی خوبی در جلوگیری از گسترش کووید-۱۹ می‌باشد [۱۶] و به تعبیر هندسی، می‌تواند اوج نمودار تعداد مبتلایان (دارای علامت) را پهن کند. چنانکه شکل ۴ در بخش ۵، این مفهوم را به تصویر کشیده است. اکنون به منظور ورود به بحث استفاده از کنترلر مدل پیش‌بین، اهداف کنترلی جهت عدم شیوع کووید-۱۹ را همانطور که در جدول ۴ آمده است، در نظر می‌گیریم:

جدول ۴: اهداف کنترلی مسئله کنترل مدل پیش‌بین

معادله ریاضی	هدف کنترلی	
I_s کمینه نمودن	کاهش یافتن اوج نمودار افراد علامت دار تا حد ممکن	۱
$\forall t: I_s \leq n_{ICU}(1 + \varepsilon)$	اطمینان یافتن از کوچکتر بودن اوج از تعداد تخت های ICU	۲
کمینه سازی $u(t)$ که برای زمان تا حد ممکن طولانی صفر باشد.	تشخیص سیاست‌های محدودیت-های اجتماعی برای مدت زمان تا حد ممکن کوتاه	۳
اطمینان یافتن از اینکه $u(t)$ به صورت قطعه‌ای ثابت می‌باشد و در هر حالت ۰، ۱، ۲ یا ۳ برای نمونه-های N_p می‌باشد.	اجتناب کردن از تغییر یافتن اعمال محدودیت‌ها (استمرار یک دوره زمانی حداقل N_m روز در هر شرایط)	۴

از این پس، در این مقاله یک سیگنال کنترلی قطعه‌ای ثابت $u(t)$ را که از اندازه‌های متناوب تولید شده است، $T_s = 1$ ، در نظر می‌گیریم. جهش‌های کنترلی در نظر گرفته شده را با $\Delta u(k)$ نمایش می‌دهیم. بنابراین ایجاب می‌کند که:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (6)$$

لذا قانون واقعی کنترلی که کنترلر آن را بر سیستم در طول زمان نمونه برداری اعمال می‌کند، $u(k) = u(kT_s)\Delta$ است. $\forall t: kT_s \leq t \leq (k+1)T_s$ (۷) و به وضوح، یک سیگنال قطعه‌ای خطی است.

۲-۱ کنترلر مدل پیش‌بین مبتنی بر محدودیت‌های اجتماعی

اکنون، یک تابع هزینه مناسب که به دنبال برآورده ساختن اهداف ۱ تا ۳ در بخش قبل است را، در نظر می‌گیریم که به صورت زیر بیان شده است:

$$J = \sum_{j=1}^{N_p} \frac{I_s(k+j|k)^t Q_I I_s(k+j|k)}{(I_s^{max})^2} + \sum_{j=0}^{N_p-1} u_s(k+j|k)^t (1 - Q_I) u_s(k+j|k) \quad (8)$$

$$\forall t: I_s(k+j|k) \leq n_{ICU}(1 + \varepsilon) \quad \forall j = 1, \dots, N_p \quad (9)$$

$$0 \leq u(k+j|k) \leq 3 \quad \forall j = 1, \dots, N_p - 1 \quad (10)$$

$$u(k+j+1|k) = u(k+j|k) + \Delta u(k+j|k) \quad \forall j = 1, \dots, N_p - 1 \quad (11)$$

$$\Delta u(k+j|k) = 0 \quad \forall j = 1, \dots, N_p - 1 \quad (12)$$

$$\Delta u(k+m|k) = 0, \quad ||\Delta u(k+j|k) - \Delta u(k+j|k)|| = 1 \quad \forall m = j, \dots, j + N_m \quad (13)$$

اکنون با در نظر گرفتن تابع هزینه و قیود بالا، بر سه مورد زیر تاکید می‌کنیم:

۱. معادله (۹) تضمین می‌کند که میزان اوج مبتلایان علامت‌دار کاهش یافته است و بیشتر از تعداد تخت‌های ICU نیست.

۲. معادله (۱۰) اطمینان می‌دهد که در اعمال محدودیت‌های اجتماعی، سیگنال کنترلی کراندار شده است. معادله (۱۱) نیز در مورد اینکه این که قانون کنترلی، به صورت قطعه‌ای ثابت است، اطمینان لازم را می‌دهد. معادله (۱۲) نیز ایجاب می‌کند که تغییرات سیگنال کنترلی دارای حالت-های چهارگانه ۰، ۱، ۲ یا ۳ است.

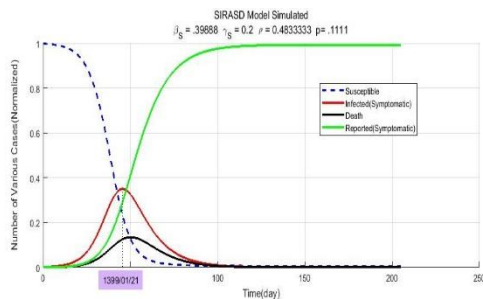
۳. معادله (۱۳) ایجاب می‌کند که کوچکترین زمان توقف نمونه‌های N_m نیز محاسبه شده است. یعنی میزان جهش کنترلی مشخص می‌کند که سیگنال u برای یک دوره مینیمال از روزهای N_m ، که $N_p > N_m$ ، در یک حالت بدون اعمال محدودیت اجتماعی، ضعیف، متوسط یا شدید باقی بماند.

همچنین باید توجه نمود که متغیر حدود تغییرات ε به عنوان یک متغیر محدود شده و بدون درجه آزادی، باید کمینه شود. بنابراین یک جریمه را به صورت $\varepsilon^t Q_I \varepsilon$ در تابع هزینه در نظر می‌گیریم. لذا:

جدول ۵: پارامترهای دست آمده از مدل SIRASD

پارامتر	β_A	β_S	γ_A	γ_S	ρ	p
مقدار	۰.۲۳۷۱	۰.۳۹۸۸	۰.۱۴	۰.۲	۰.۴۸۳۳۳	۰.۱۱۱۱

شکل ۲ بیانگر شبیه سازی مدل SIRASD بدون اعمال محدودیت اجتماعی در ایران به منظور ارائه یک توصیف از وضعیت انتشار بیماری در بازه زمانی ۹۸/۱۱/۳۰ تا ۱۳۹۹/۰۶/۲۱ با استفاده از نرم افزار متلب است. در این شکل، تعداد موارد مشکوک، مبتلا(علامت دار)، بهبود یافته(علامت دار)، فوت شده بیماری کووید-۱۹ نشان داده شده است. به علاوه در مدل شبیه سازی شده، زمان اوج بیماری در موج اول ۱۳۹۹/۰۱/۲۱ می باشد که با زمان اوج موج اول داده‌های واقعی انطباق مناسبی دارد.



شکل ۲) شبیه سازی مدل انتشار کووید-۱۹ SIRASD در ایران (بدون اعمال محدودیت اجتماعی)

۲-۵. شناسایی پارامترهای مدل پیشنهادی با استفاده از

الگوریتم ژنتیک

اکنون نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار متلب و بهره گیری از جعبه ابزار ۱۰ Yalmip الگوریتم ژنتیک به شناسایی پارامترهای مدل پیشنهادی SIRASD-Constrained بر اساس داده‌های اصلی در همان دوره زمانی بیان شده در قسمت قبل، پرداخته‌ایم. اکنون بدین منظور داده‌های اصلی و داده‌های حاصل شبیه سازی را با در نظر گرفتن تابع هدف (۱۶) و

$$\theta = [\beta_A, \beta_S, \gamma_A, \gamma_S, \rho, p, \alpha^{Normal}, \alpha^{Mild}, \alpha^{Moderate}, \alpha^{hard}, \gamma_{intensity}, \varphi_{inf}]$$

به منظور یافتن پارامترهای مدل SIRASD-Constrained از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کنیم. بنابراین نتایج شناسایی سیستم مطابق شکل ۳ می‌باشد.

همچنین مقدار پارامترهای حاصل از شناسایی مدل پیشنهادی در دوره زمانی بیان شده در جدول ۶ آمده است.

$$J = \sum_{j=1}^{N_p} \frac{I_s(k+j|k)^t Q_1 I_s(k+j|k)}{(I_s^{max})^2} + \sum_{j=0}^{N_p-1} u_s(k+j|k)^t (1-Q_1) u_s(k+j|k) + \varepsilon^t Q_1 \varepsilon \quad (14)$$

پس به طور خلاصه داریم:

$$\min_{U_k} J$$

s.t:

$$\begin{cases} \text{SIRASD - Constrained گسسته} \\ I_s \leq n_{ICU} (1 + \varepsilon) \quad \forall j = 1, \dots, N_p \end{cases} \quad (15)$$

محدودیت سیگنال کنترلی (۱۳ - ۹)

۵- نتایج شبیه سازی

۱-۵ شناسایی پارامترهای مدل SIRASD با استفاده از

الگوریتم ژنتیک

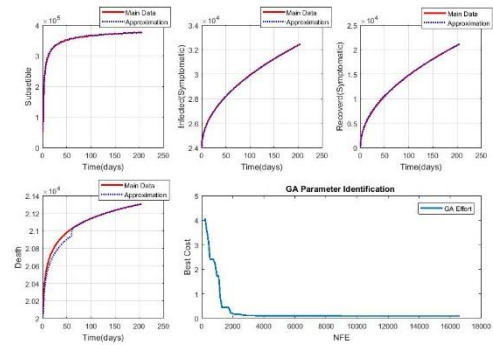
در این بخش از داده‌های مربوط به گزارش‌های وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی کشور (ستاد ملی کرونا)، در بازه زمانی ۲۰۵ روز از ۱۳۹۹/۱۲/۰۳ تا ۱۳۹۹/۰۶/۲۱، که از آن به عنوان داده‌های واقعی یاد می‌کنیم، استفاده شده است. به منظور فراخوانی داده‌ها توسط نرم افزار متلب، ابتدا داده‌ها در نرم افزار اکسل وارد شده است. که ستونهای اول تا نهم آن را به ترتیب مربوط به تاریخ، تعداد افراد مشکوک، مبتلا، بهبود یافته، فوت شده، مبتلای علامت دار، مبتلای بدون علامت، بهبود یافته علامت‌دار، بهبود یافته بدون علامت تشکیل می‌دهند. سپس شناسایی پارامترها برای هر دو مدل SIRASD-Constrained و SIRASD انجام شده است. اساس کار شناسایی پارامترها بر چهار زیر برنامه یعنی داده‌های اصلی، استفاده از مدل SIRASD یا SIRASD-Constrained به منظور شبیه سازی داده‌ها، تابع هزینه و الگوریتم ژنتیک، استوار است. در واقع الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه سازی خطای بین داده‌های اصلی و داده‌های حاصل از شبیه سازی با توجه به تابع هزینه زیر به عنوان رابطه (۱۶)

$$\min_{\theta} \frac{1}{2} \sum_t (Ln(I(t) + R(t)/\bar{I}_S(t) + \bar{I}_R(t))^2 + Ln(D(t)/\bar{D}(t))^2)$$

از نوع کمینه سازی به شناسایی پارامترها می‌پردازد. که $\bar{I}_S(t)$ و $\bar{I}_R(t)$ به ترتیب مقادیر به دست آمده از شبیه سازی مدل هستند. ابتدا به منظور شبیه سازی داده‌ها در حالت بدون اعمال محدودیت در ایران، تخمینی از پارامترهای تعداد افراد مبتلا، نرخ انتقال، نرخ فوت و احتمال ابتلا به صورت دارای علامت به دست می‌آوریم که اگر $\theta = [\beta_A, \beta_S, \gamma_A, \gamma_S, \rho, p]$ آنگاه پارامترها مانند آنچه در جدول ۵ آمده است، به دست می‌آیند:

جدول ۸: وضعیت تعداد تخت‌های مراقبت‌های ویژه در بیمارستان‌های سازمان‌ها و وزارت بهداشت ایران

تعداد تخت در بیمارستان‌های		انواع ICU
وزارت بهداشت	سازمان‌ها	
۸۱۲	۱۱۶۴	جراحی
۳۰۴۳	۴۶۹۶	جنرال
۸۷۴	۱۱۶۲	داخلی
۶۳۳	۱۱۰۶	قلب باز
۱۴۲	۱۳۶	سوختگی
۵۴۹۴	۸۲۶۴	کل



شکل ۳: شناسایی پارامترهای مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

جدول ۶: پارامترهای بدست آمده از مدل SIRASD-Constrained

پارامتر	β_A	β_S	γ_A	γ_S	ρ	p
مقدار	.۱۴۶۲	.۰۶۲۵	.۱۳۹۵	.۲	.۰۹۵۲	.۱۲

در خصوص پاسخ جمعیت به محدودیت‌های اجتماعی، مقادیر پاسخ بیشینه معادله دیفرانسیل و سایر پارامترهای مربوطه در جدول ۷ آمده است:

جدول ۷: پارامترهای بدست آمده برای برقراری محدودیت‌های اجتماعی

پارامتر	α_{Normal}	α_{Mild}	$\alpha_{Moderate}$	α_{hard}	$\gamma_{intensity}$	ϕ_{inf}
مقدار	.۶۸۷۱	.۷۲۴۳	.۲۸۷۳	.۲۴۳۹	.۱۵۰۹	.۱۲۸۳

در ادامه، جدول ۸ تعداد پایه تخت‌های ICU در دسترس در شهرهای ایران را نشان می‌دهد. آمارهای رسمی و غیر رسمی ارائه شده، این تعداد را در بهترین حالت کمتر از ۱۴۰۰۰ تخت در کل کشور نشان می‌دهد. لذا این تعداد محدود، اهمیت کمین نمودن تعداد مبتلایان (علامت‌دار) را به طوریکه همواره تعدادشان از تعداد تخت‌های مراقبت‌های ویژه بیشتر نشود، نشان می‌دهد [۲۸].

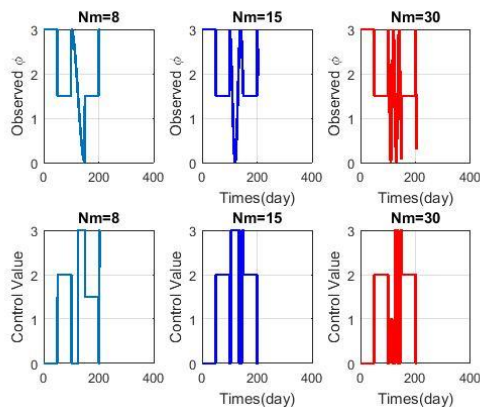
۳-۵ مقایسه و تحلیل نتایج استفاده از کنترلر مدل پیش‌بین در کنترل انتشار ویروس کووید-۱۹

اکنون به منظور روشن تر شدن مباحث، تحلیلی از نتایج پیاده‌سازی مثال عددی ارائه شده است. در شکل ۴، به منظور انجام یک مقایسه بین وضعیتی که در فروردین ماه ۱۳۹۹ در ایران رخ داده است، وضعیت بدون اعمال محدودیت‌های اجتماعی مدل پیشنهادی را به صورت خط پر نشان داده‌ایم. همچنین نتایج اعمال محدودیت‌های اجتماعی با میزان شدت خفیف، متوسط و شدید نیز توسط خط‌چین‌ها مشخص شده است.

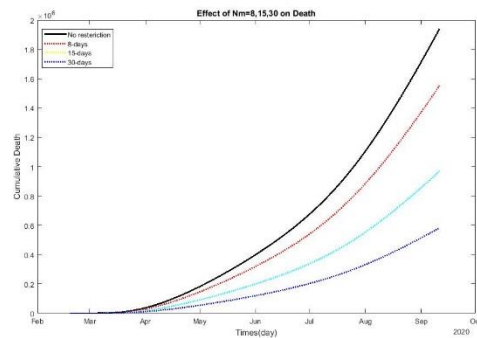
یادآوری می‌کنیم که $u = 0, u = 1, u = 2, u = 3$ به ترتیب نشانگر شرایط بدون اعمال محدودیت مدل پیشنهادی، اعمال محدودیت خفیف، اعمال محدودیت متوسط و اعمال محدودیت شدید است. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، اوج نمودار تعداد مبتلایان دارای علامت در مقایسه با وضعیت واقعی با استفاده از کنترلگر طراحی شده مبتنی بر کنترلر مدل پیش‌بین و با اعمال سطوح مختلف محدودیت‌ها پهن شده است. به وضوح با اعمال سطوح مختلف محدودیت‌های اجتماعی متناسب با تعداد تخت‌های مراقبت‌های ویژه، با میزان کمتری از موارد ابتلای بیماران کووید-۱۹ در مقایسه با آنچه که در ۲۱ فروردین ماه ۱۳۹۹ با عنوان اوج ابتلا در این ماه از آن نام برده می‌شود، مواجه شده ایم و شرایط بسیار بهتری برای سیستم سلامت رخ داده است. در واقع، حتی یک اعمال محدودیت متوسط یعنی اعمال کنترل $u = 2$ هم توانسته است زندگی بیش از ۲۵۰۰۰ نفر را با در نظر گرفتن نتایج سناریو اعمال محدودیت‌های اجتماعی نجات دهد و زمان اوج ابتلا بیش از ۸۵ روز به تاخیر بیفتد. از طرفی با یک اعمال محدودیت احتیاط آمیز $u = 1$ باشد، حدود ۱۳۵۰۰ نفر از خطر ابتلا دور مانده‌اند. همچنین اوج ابتلا نیز حدود ۷۰ روز به تاخیر افتاده است. رویکرد سختگیرانه‌تر با اعمال $u = 1$ نیز، فارغ از تبعات اقتصادی و روانی جامعه، که در بخش ۱ بدان اشاره شد، حدود ۲۸۰۰۰ نفر کاهش ابتلا و حدود ۱۰۰ روز تاخیر را به دنبال داشته است. در واقع هرگاه $\phi(t) \neq 3$ یعنی سیاست‌های اعمال محدودیت‌های اجتماعی به کار گرفته می‌شوند، که به دنبال آن، میزان ابتلا دچار کاهش گردیده و زمان اوج آن نیز به تاخیر افتاده است.

به طور مشابه سایر نتایج حاصل از پیاده‌سازی مثال توسط نرم افزار متلب و اعمال کنترلگر مدل پیش‌بین با افق‌های پیش‌بینی مختلف و مناسب، جهت مقایسه نقطه‌ای اوج تعداد مبتلایان (دارای علامت) روزانه در ماه‌های

میزان متغیر تصمیم اعمال شده (به وسیله بهینه سازی در کنترلر مدل پیش بین) و نتایج میزان اعمال محدودیت‌های اجتماعی ϕ متناظر را نشان می دهد. در سیاست‌های کنترلی که از بکارگیری رویه کنترلر مدل پیش بین برای مقادیر مختلف افق پیش بینی N_m نتیجه می‌گردد، نشان داده شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که تقریباً چه زمانی باید سطوح مختلف محدودیت‌های اجتماعی را اعمال و چه زمانی را برای توقف آن‌ها اقدام نمود. در واقع، سیاست‌های واقعی بکار گرفته شده به مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده، وابسته هستند، به طوری که یک بهنگام سازی روزانه از نتایج کنترلر مدل پیش بین روی آن انجام می‌شود. همچنین، این نتایج یک پیش بینی از تقریب زمان تعیین یا درخواست این اقدامات را مشخص می‌کند. بهترین نتایج، باید تا حدود اواسط خرداد ماه ۱۳۹۹ از اعمال نمودن محدودیت‌های اجتماعی پیروی کنند.



شکل ۵) نتایج اعمال محدودیت‌های اجتماعی با افق‌های کنترل مختلف
روز $N_m = 8, 15, 30$

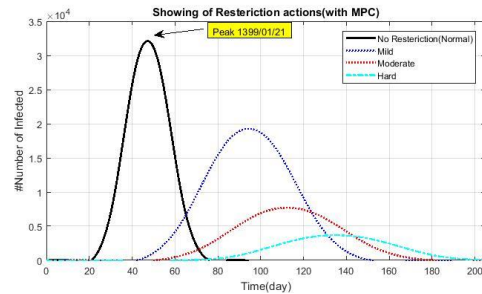


شکل شماره ۶) مقایسه اعمال سطوح مختلف محدودیت‌های اجتماعی (بدون محدودیت، خفیف، متوسط و شدید) به مدت ۸، ۱۵ و ۳۰ روز بر روی تعداد تجمعی فوت شدگان

تاثیر استمرار در اعمال کنترلر مدل پیش بین، بر روی تعداد تجمعی فوت شدگان، در خرداد ۱۳۹۹ در شکل ۶ نشان داده شده است. که در آن تاثیر اعمال محدودیت‌های اجتماعی به مدت ۸، ۱۵ و ۳۰ روز را مقایسه نموده ایم. در شکل ۶، خط پر میزان تعداد تجمعی فوت شدگان بدون

اردیبهشت تا شهریورماه ۱۳۹۹ در نتیجه اعمال کنترلر مدل پیش بین با وضعیت واقعی در جدول ۹ خلاصه شده است.

به وضوح، استفاده از این کنترلر، اوج تعداد مبتلایان در هر ماه را کاهش و زمان آن را نیز به تاخیر انداخته است. به بیان دیگر، مشابه شکل ۴، کنترلر در پهن کردن اوج نمودار ابتلا قابلیت مناسبی دارد.



شکل ۴) نتایج به کارگیری محدودیت‌های اجتماعی در کمینه کردن اوج مبتلایان دارای علامت با استفاده از کنترلر مدل پیش بین

جدول ۹: مقایسه وضعیت واقعی رخ داده و وضعیت استفاده از کنترلر مدل پیش بین در مورد تعداد مبتلایان دارای علامت.

نتیجه استفاده از کنترلر مدل پیش بین		وضعیت اعمال محدودیت			وضعیت واقعی	
میزان کاهش	کاهش	$u = 3$	$u = 2$	$u = 1$	تعداد	تاریخ
تاخیر (روز)	ابتلا (نفر)	*	*	*	۱۶۸۰	۱۳۹۹/۰۲/۱۷
۷	۲۵۱	*	*	*	۳۵۷۴	۱۳۹۹/۰۳/۱۵
۴۲	۱۰۵۱	*	*	*	۲۶۹۱	۱۳۹۹/۰۴/۱۸
۱۸	۵۳۷	*	*	*	۲۷۵۱	۱۳۹۹/۰۵/۱۴
۱۶	۴۲۰	*	*	*	۲۲۴۵	۱۳۹۹/۰۶/۰۳
۱۲	۳۴۹	*	*	*		

اکنون به ازای مقادیر مختلف افق کنترل N_m ، کنترلر مدل پیش بین طبق (۱۵) پیاده‌سازی و نتایج مربوط به آن در ادامه ارائه شده است. برای مثال، با هدف انجام یک بده-بستان کافی بین کاهش اوج و اعمال محدودیت‌های اجتماعی، ماتریس اسکالروژن Q_I انتخاب می‌شود. به دلیل سرعت قابل توجه اشغال تخت‌های ICU بیمارستان‌های ایران در تاریخ ۱۳۹۹/۰۱/۲۱، ماتریس اسکالر $Q_I = 0.89$ را انتخاب می‌کنیم و این بدان معنی است که پس از یک دوره زمانی بدون اعمال محدودیت‌ها، تلاش کنترلی بیشتری توسط رویه کنترلر مدل پیش بین برای کاهش تعداد افراد مبتلای علامت دار مورد نیاز است. همچنین در این قسمت، با در نظر گرفتن افق پیش بینی ثابت به صورت N_p برابر ۵۰ روز، نتایج را برای افق‌های مختلف کنترل $N_m = 8, 15, 30$ روز، بررسی کرده‌ایم. شکل ۵،

first century science for effective epidemic response." *Nature*, 575(7781), 130–136.

[5] Chudik, A., Pesaran, M. H., & Rebucci, A. (2020). "Voluntary and mandatory social distancing: Evidence on COVID-19 exposure rates from Chinese provinces and selected countries." *Technical Report. National Bureau of Economic Research*.

[6] Del Rio, C., & Malani, P. N. (2020). "Covid-19 new insights on a rapidly changing epidemic." *JAMA*.

[7] J. Wu, B. Tang, N.L. Bragazzi, K. Nah, Z. (2020) "McCarthy Quantifying the role of social distancing, personal protection and case detection in mitigating covid-19 outbreak in Ontario, Canada." *J Math Ind*, 10 (1) (2020), pp. 1-12.

[8] Hellewell, J., Abbott, S., Gimma, A., Bosse, N. I., Jarvis, C. I., Russell, T. W., Sun, F., et al. (2020). "Feasibility of controlling COVID-19 outbreaks by isolation of cases and contacts." *The Lancet Global Health*.

[9] Eichenbaum, M. S., Rebelo, S., & Trabandt, M. (2020). "The macroeconomics of epidemics." *Working Paper. National Bureau of Economic Research*. <https://doi.org/10.3386/w26882>.

[10] Gormsen, N. J., & Koijen, R. S. J. (2020). "Coronavirus: Impact on stock prices and growth expectations" (pp. 1–27). *Working Paper of the University of Chicago*.

[11] Kissler, S. M., Tedijanto, C., Goldstein, E., Grad, Y. H., & Lipsitch, M. (2020). "Projecting the transmission dynamics of SARS-COV-2 through the post pandemic period." *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.abb5>.

[12] Piunovskiy, A., Plakhov, A., & Tumanov, M. (2020). "Optimal impulse control of a siredemic." *Optimal Control Applications and Methods*, 41(2), 448–468. <https://doi.org/10.1002/oca.2552>.

[13] Ullah, S., Khan, M. (2020). "Modeling the impact of nonpharmaceutical interventions on the dynamics of novel Coronavirus with optimal control analysis with a case study." *Chaos Solitons and Fractals*.

[14] Perkins, T.A., Guido España, G. (2020). "Optimal Control of the COVID-19 Pandemic with Non-pharmaceutical Interventions." *Bulletin of Mathematical Biology*, 82-118.

[15] Obsu, L.L., Balcha, S. (2020). "Optimal control strategies for the transmission risk of COVID-19." *JOURNAL OF BIOLOGICAL DYNAMICS*. VOL. 14, NO. 1, 590–607. <https://doi.org/10.1080/17513758.2020.1788182>.

[16] Péni, T., Csutak, B., Szederkényi, G., Röst, G. (2020). "Nonlinear model predictive control with logic constraints for COVID-19 management." *Nonlinear Dyn* (2020) 102:1965–1986.

[17] Kohler, J., Schwenkel, L., Koch, A., Berberich, J., Pauli, P., & Allgower, F. (2020). "Robust and optimal

اعمال محدودیت اجتماعی با استفاده از مدل پیشنهادی مبتنی بر کنترل مدل پیش بین را نشان می‌دهد. خط چین‌ها نیز معرف این تعداد با اعمال سایر سطوح محدودیت‌های اجتماعی هستند. همانطور که مشخص است در اثر اعمال محدودیت به مدت ۸، ۱۵ و ۳۰ روز، تعداد تجمعی فوت شدگان به ترتیب در حدود ۲۳٪، ۵۰٪ و ۷۴٪ کاهش می‌یابند.

۶- نتیجه گیری

از آنجا که در بین پژوهش‌های انجام شده در زمینه بیماری کووید-۱۹ از روش‌های نوین مانند کنترل مدل پیش‌بین که دارای مزایای مناسبی می‌باشد کمتر استفاده شده است و می‌تواند به مهار انتشار بیماری همه گیر کووید-۱۹ قبل از دست‌رسی همگانی به واکسن، کمک شایانی نماید. بنابراین با توسیع یک مدل رایج برای توصیف بیماری‌های همه گیر، یک مدل پیشنهادی را ارائه نمودیم. همچنین، با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک پارامترهای مدل را شناسایی شده‌اند و با در نظر گرفتن یک تابع هزینه مناسب و محدودیت‌هایی همچون تعداد تخت‌های ICU در کشور، یک مسئله با ساختار کنترل مدل پیش‌بین مقید مطرح کردیم. پس از حل مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر کنترل مدل پیش‌بین، تاثیر مثبت اعمال محدودیت‌های اجتماعی را بر کاهش اوج تعداد مبتلایان دارای علامت و همچنین کاهش تعداد تجمعی فوت شدگان به عنوان قابلیت‌های مناسب در قالب نتایج عددی نشان دادیم.

همچنین پیشنهاد می‌گردد، با توجه به نتایج بدست آمده و پیش‌بینی‌های انجام شده در شبیه‌سازی و همچنین بررسی شکل‌ها، جدول ۹، و با در نظر گرفتن افق‌های پیش‌بینی و کنترل مناسب، دست کم تا زمان انجام واکسیناسیون عمومی از اعمال سیاست ایمنی گله‌ای صرف‌نظر شود. این موارد، نتایج معرفی شده در [۱۷] که بیان می‌کند، هیچیک از راهکارهای اعمال محدودیت‌های اجتماعی یا ایمنی گله‌ای، به تنهایی برای ریشه‌کنی قطعی همه‌گیری ویروس کووید-۱۹ مناسب نیستند را، تایید می‌کند. همچنین این نتایج با [۸] نیز مطابقت دارد.

مراجع

[1] T. van den Boom and A. Stoorvogel. "Model Predictive Control", CRC Press, 2010.

[2] World Health Organization. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus>.

[3] S. Zhao, H. Chen, "Modeling the epidemic dynamics and control of COVID-19 outbreak in China", *Quantitative Biology* 8 (2020) 11–19.

[4] Bedford, J., Farrar, J., Ihekweazu, C., Kang, G., Koopmans, M., Nkengasong, J. (2019). "A new twenty-

predictive control of the COVID-19 outbreak".arXiv:2005.03580.

[18] Zurakowski, R., Messina, M. J., Tuna, S. E., & Teel, A. R. (2004). "HIV treatment scheduling via robust nonlinear model predictive control," Vol. 1. 2004 5th Asian control conference (IEEE cat. no. 04ex904) (pp. 25–32). IEEE.

[19] Hosseini, E., Ghafoor, K. Z., Emrouznejad. (2020). "A. COVID-19 Optimizer Algorithm, Modeling and Controlling of Coronavirus Distribution Process". IEEE JOURNAL OF BIOMEDICAL AND HEALTH INFORMATICS, VOL. 24, NO. 10, OCTOBER 2020

[20] Kucharski, A. J., Russell, T. W., Diamond, C., Liu, Y., Edmunds, J., Funk, S., Munday, J. D., et al. (2020). "Early dynamics of transmission and control of COVID-19: A mathematical modelling study. The Lancet Infectious Diseases."

[21] Kermack, W. O., & Mc Kendrick, A. G. (1927). "A contribution to the mathematical theory of epidemics." Proceedings of the Royal Society A, 115, 700–721.

[22] Keeling, M. J., & Rohani, P. (2011). "Modeling infectious diseases in humans and animals."

[23] Robinson, M., & Stilianakis, N. I. (2013). "A model for the emergence of drug resistance in the presence of asymptomatic infections." Mathematical Biosciences, 243, 163–177.

[24] Arino, J., Brauer, F., van-den Driessche, P., Watmough, J., & Wu, J. (2008). "How will country-based mitigation measures influence the course of the COVID-19 epidemic?" Journal of Theoretical Biology, 253, 118–130.

[25] Camacho, E. F., & Bordons, C. (2013). "Model predictive control. Springer Science Business Media."

[26] Wu, J., Tang, B., Bragazzi, N., Nah, K., McCarthy, Z. (2020). "Quantifying the role of social distancing, personal protection and case detection in mitigating COVID-19 outbreak in Ontario", Canada. J. Math. Ind. 10(1), 15 (2020).

[27] Bastos, S. B., & Cajueiro, D. O. (2020). "Modeling and forecasting the early evolution of the covid-19 pandemic in Brazil". arXiv:2003.14288.

[۲۸] راهنمای جامع استانداردهای اعتبار بخشی ملی بیمارستان‌های ایران. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی کشور. ویرایش چهارم، سال ۱۳۹۸.