

## مقدمه

این گزارش، جزئیات فنی و معادلات ساختاری مدل تعادل عمومی پویای تصادفی<sup>۱</sup> را که برای تحلیل اثرات شوک‌های بیولوژیک طراحی شده است، ارائه می‌دهد. این مستند در دو بخش اصلی سازماندهی شده است. بخش اول به استخراج معادلات ساختاری و شرایط بهینگی مدل از اصول اولیه اقتصاد خرد می‌پردازد. بخش دوم، روش‌شناسی کالیبراسیون پارامترها را با توجه به چالش‌های منحصربه‌فرد اقتصادهای نوظهور (ایران، هند و چین) تشریح کرده و مقادیر نهایی پارامترها را بر اساس مرور جامع ادبیات علمی مستند می‌سازد. هدف نهایی این گزارش، ارائه یک مدل کاملاً مشخص و آماده برای شبیه‌سازی و تحلیل‌های سیاستی است.

## بخش ۱: استخراج معادلات ساختاری مدل

این بخش، فرآیند گام به گام استخراج معادلات رفتاری عاملان اقتصادی مدل (خانوار و بنگاه) را از مبانی خرد تشریح می‌کند.

### ۱.۱. مفروضات و مسائل بهینه‌سازی

در این بخش، مسائل بهینه‌سازی برای هر یک از عاملان اقتصادی بر اساس چارچوب نظری ذکر شده در فصل سوم پایان‌نامه تعریف می‌شود.

#### ۱.۱.۱. مسئله خانوار

مسئله خانوار نماینده در این اقتصاد، انتخاب یک توالی از مصرف ( $C_t$ )، عرضه نیروی کار ( $L_t$ )، سرمایه‌گذاری ( $I_{K,t}$ ) و میزان اوراق قرضه ( $B_t$ ) برای تمام دوره‌های زمانی آینده ( $s=t, \dots, \infty$ ) است، به گونه‌ای که تابع مطلوبیت انتظاری بین‌زمانی خود را حداکثر کند.

تابع هدف: تابع مطلوبیت خانوار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_t = E_t \sum_{s=t}^{\infty} \beta^{s-t} \left( H_{\{C,s\}} \left( \frac{C_s^{1-\sigma_C}}{1-\sigma_C} \right) - \mu_L \frac{L_s^{1+\phi}}{1+\phi} \right)$$

قیود: این بهینه‌سازی تحت دو قید اصلی صورت می‌گیرد:

<sup>۱</sup> DSGE

۱. قید بودجه پویای خانوار<sup>۱</sup>: این قید بیان می‌کند که مجموع هزینه‌های خانوار (شامل مصرف، سرمایه‌گذاری و خرید اوراق قرضه) نمی‌تواند از مجموع درآمدهای آن (شامل درآمد نیروی کار، درآمد اجاره سرمایه، اصل اوراق قرضه دوره قبل و سود دریافتی از بنگاه‌ها) بیشتر باشد.

$$P_t C_t + P_t I_{K,t} + Q_{B,t} B_t = W_t L_t + R_{K,t} K_t + B_{t-1} + P_t D_t$$

۲. قانون انباشت سرمایه<sup>۲</sup>: موجودی سرمایه در دوره بعد ( $K_{t+1}$ ) برابر است با موجودی سرمایه دوره فعلی پس از استهلاک، به علاوه سرمایه‌گذاری جدید. این معادله همچنین شامل هزینه‌های تعدیل سرمایه‌گذاری است که نشان‌دهنده اصطکاک در تغییر سریع حجم سرمایه‌گذاری است:

$$K_{t+1} = (1 - \delta_K) K_t + \left[ 1 - \Omega \frac{I_{K,t}}{I_{K,t-1}} \right] I_{K,t}$$

تعریف متغیرها و پارامترها:

- $C_t$ : مصرف حقیقی
- $L_t$ : عرضه نیروی کار
- $K_t$ : موجودی سرمایه
- $I_{K,t}$ : سرمایه‌گذاری حقیقی
- $B_t$ : اوراق قرضه اسمی
- $P_t$ : سطح عمومی قیمت‌ها
- $W_t$ : دستمزد اسمی
- $R_{K,t}$ : نرخ اجاره اسمی سرمایه
- $Q_{B,t}$ : قیمت اوراق قرضه
- $D_t$ : سود حقیقی دریافتی از بنگاه‌ها
- $\beta$ : عامل تنزیل بین‌زمانی

<sup>1</sup> Dynamic Budget Constraint

<sup>2</sup> Law of Capital Accumulation

- $\sigma_C$ : عکس کشش جانشینی بین زمانی مصرف
- $\phi$ : عکس کشش عرضه نیروی کار<sup>۱</sup>
- $\mu_L$ : وزن عدم مطلوبیت کار در تابع مطلوبیت
- $\delta_K$ : نرخ استهلاک سرمایه
- $\Omega(\cdot)$ : تابع هزینه تعدیل سرمایه گذاری
- $H_{C,t}$ : تعدیل گر مطلوبیت مصرف (وابسته به شوک بیولوژیک)

### ۱.۲.۱. تشکیل تابع لاگرانژین

برای حل مسئله بهینه سازی مقید خانوار، از روش لاگرانژین استفاده می کنیم. این روش به ما اجازه می دهد تا تابع هدف (مطلوبیت) و قید بودجه را در یک عبارت واحد ترکیب کنیم. برای این کار، یک ضریب لاگرانژ متغیر با زمان،  $\lambda_t$ ، را به قید بودجه تخصیص می دهیم.

این ضریب دارای تفسیر اقتصادی بسیار مهمی است  $\lambda_t$ : مطلوبیت نهایی یک واحد درآمد حقیقی اضافی برای خانوار در زمان  $t$  را نشان می دهد که به آن قیمت سایه ای ثروت نیز گفته می شود.

بنابراین، تابع لاگرانژین به صورت زیر تشکیل می شود. توجه داشته باشید که برای سادگی، قید بودجه را به صورت حقیقی (تقسیم تمام جملات بر سطح قیمت  $P_t$ ) و به گونه ای بازآرایی کرده ایم که برابر با صفر باشد:

$$\mathcal{L} = E_t \sum_{s=t}^{\infty} \beta^{s-t} \left[ \left( H_{C,s} \frac{C_s^{1-\sigma_C}}{1-\sigma_C} - \mu_L \frac{L_s^{1+\phi}}{1+\phi} \right) - \lambda_s \left( C_s + I_{K,s} + \frac{Q_s^B B_s}{P_s} - \frac{W_s L_s}{P_s} - \frac{R_{K,s} K_s}{P_s} - \frac{B_{s-1}}{P_s} - D_s \right) \right]$$

حال با در دست داشتن این تابع، می توانیم با مشتق گیری نسبت به هر یک از متغیرهای انتخاب خانوار، شرایط بهینگی را استخراج کنیم. قید انباشت سرمایه نیز در هنگام استخراج شرایط مرتبه اول مربوط به سرمایه گذاری ( $I_{K,t}$ ) و سرمایه ( $K_{t+1}$ ) مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

### ۱.۳.۱. استخراج شرایط مرتبه اول<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> Frisch elasticity

<sup>۲</sup> FOCs

در این مرحله، با مشتق‌گیری جزئی از تابع لاگرانژین ( $L$ ) نسبت به هر یک از متغیرهای انتخاب خانوار ( $L_t, B_t, C_t$  و  $K_{t+1}$ ) و برابر قرار دادن نتیجه با صفر، شرایط لازم برای بهینگی را استخراج می‌کنیم. این معادلات، که به عنوان شرایط مرتبه اول<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند، رفتار بهینه خانوار را در هر یک از ابعاد تصمیم‌گیری توصیف می‌کنند.

۱.۳.۱.۱. شرط بهینگی برای مصرف ( $C_t$ ) برای یافتن سطح بهینه مصرف، از لاگرانژین نسبت به  $C_t$  مشتق می‌گیریم:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial C_t} = H_{C,t} \frac{(1 - \sigma_C) C_t^{-\sigma_C}}{1 - \sigma_C} - \lambda_t = 0$$

با ساده‌سازی عبارت فوق، به اولین شرط مرتبه اول می‌رسیم:

$$H_{C,t} C_t^{-\sigma_C} - \lambda_t = 0$$

این معادله بیان می‌کند که در نقطه بهینه، مطلوبیت نهایی حاصل از یک واحد مصرف اضافی (سمت چپ) باید دقیقاً برابر با مطلوبیت نهایی ثروت ( $\lambda_t$ ) باشد.

۲.۳.۱.۱. شرط بهینگی برای عرضه نیروی کار ( $L_t$ ) برای یافتن میزان بهینه عرضه نیروی کار، از لاگرانژین نسبت به  $L_t$  مشتق می‌گیریم:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L_t} = -\mu_L \frac{(1 + \phi) L_t^\phi}{1 + \phi} - \lambda_t \left( -\frac{W_t}{P_t} \right) = 0$$

که پس از ساده‌سازی نتیجه می‌دهد:

$$-\mu_L L_t^\phi + \lambda_t \frac{W_t}{P_t} = 0$$

این شرط نشان می‌دهد که در نقطه بهینه، عدم مطلوبیت نهایی کار (سمت چپ) باید با مطلوبیت نهایی حاصل از درآمد واقعی یک ساعت کار اضافی (سمت راست) برابر باشد.

<sup>1</sup> First-Order Conditions

۳.۳.۱.۱. شرط بهینگی برای اوراق قرضه ( $B_t$ ) متغیر  $B_t$  در دو دوره زمانی در لاگرانژین ظاهر می‌شود: در دوره  $t$  (به عنوان هزینه خرید) و در دوره  $t+1$  (به عنوان درآمد حاصل از اصل اوراق). مشتق‌گیری نسبت به  $B_t$  نتیجه زیر را می‌دهد:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial B_t} = -\lambda_t \frac{Q_t^B}{P_t} + E_t \left[ \beta \frac{\lambda_{t+1}}{P_{t+1}} \right] = 0$$

با جایگذاری  $Q_t^B = 1/(1+i_t)$  (که در آن  $i_t$  نرخ بهره اسمی ناخالص است) و بازآرایی، به معادله قیمت‌گذاری دارایی بدون ریسک می‌رسیم:

$$\frac{\lambda_t}{P_t(1+i_t)} = E_t \left[ \beta \frac{\lambda_{t+1}}{P_{t+1}} \right] \Rightarrow \lambda_t = E_t \left[ \beta \frac{P_t(1+i_t)}{P_{t+1}} \lambda_{t+1} \right]$$

این معادله، اساس معادله اوایلر مصرف است و نشان می‌دهد که هزینه نهایی صرف‌نظر کردن از مصرف در امروز (سمت چپ) باید با فایده نهایی انتظاری آن در فردا (سرمایه‌گذاری و مصرف در آینده، سمت راست) برابر باشد.

۴.۳.۱.۱. شرط بهینگی برای سرمایه ( $K_{t+1}$ ) تصمیم‌گیری در مورد انباشت سرمایه یک تصمیم بین‌زمانی است. هزینه نهایی یک واحد سرمایه اضافی در دوره  $t$  برابر است با از دست دادن مطلوبیت  $\lambda_t$  (زیرا خانوار باید به جای مصرف، آن را سرمایه‌گذاری کند).

فایده نهایی آن در دوره  $t+1$  به دست می‌آید که شامل سرمایه استهلاک‌نشده ( $1-\delta_K$ ) و بازده اجاره حقیقی آن  $\frac{R_{K,t+1}}{P_{t+1}}$  است. در حالت بهینه، هزینه امروز باید با فایده انتظاری فردا (با تنزیل) برابر باشد :

$$\lambda_t = E_t \left[ \beta \lambda_{t+1} \left( \frac{R_{K,t+1}}{P_{t+1}} + (1 - \delta_K) \right) \right]$$

این معادله، معادله اوایلر سرمایه است و تصمیم بهینه خانوار برای سرمایه‌گذاری را نشان می‌دهد. (شرط دقیق‌تر که هزینه‌های تعدیل را نیز در بر می‌گیرد از مشتق‌گیری نسبت به  $I_{K,t}$  حاصل می‌شود). معادلات فوق، شرایط مرتبه اول خام هستند که مبنای ریاضی تمام معادلات رفتاری خانوار در مدل را تشکیل می‌دهند. در بخش بعدی، این معادلات را به فرم‌های قابل تفسیر اقتصادی تبدیل خواهیم کرد.

۱.۴.۱. ساده‌سازی و تفسیر اقتصادی شرایط مرتبه اول

شرایط مرتبه اول که در بخش قبل استخراج شدند، روابط ریاضی بهینه را نشان می‌دهند. با این حال، با ترکیب و بازآرایی جبری این معادلات، می‌توانیم ضریب لاگرانژ ( $\lambda_t$ ) را که تفسیر اقتصادی مستقیمی ندارد، حذف کرده و به معادلات ساختاری کلیدی دست یابیم. این معادلات جدید، تفسیر اقتصادی روشنی دارند و رفتار بهینه خانوار را به شکلی ملموس توصیف می‌کنند.

۱.۴.۱.۱. معادله اوایلر مصرف (تصمیم بین‌زمانی) این معادله، تصمیم خانوار برای تخصیص بهینه مصرف بین امروز و فردا را توصیف می‌کند. برای استخراج آن، از شرایط بهینگی مصرف و اوراق قرضه استفاده می‌کنیم.

1. ابتدا، شرط مرتبه اول برای مصرف را بازنویسی می‌کنیم :

$$H_{C,t} C_t^{-\sigma_C} = \lambda_t \quad (\text{الف})$$

2. این رابطه برای دوره بعد ( $t+1$ ) نیز برقرار است :

$$H_{C,t+1} C_{t+1}^{-\sigma_C} = \lambda_{t+1} \quad (\text{ب})$$

3. حال، روابط (الف) و (ب) را در شرط بهینگی اوراق قرضه (معادله استخراج شده در بخش ۱.۳.۳) جایگذاری می‌کنیم :

$$\lambda_t = E_t \left[ \beta \frac{1+i_t}{\Pi_{t+1}} \lambda_{t+1} \right]$$

$$H_{C,t} C_t^{-\sigma_C} = E_t \left[ \beta \frac{1+i_t}{\Pi_{t+1}} (H_{C,t+1} C_{t+1}^{-\sigma_C}) \right]$$

4. با مرتب‌سازی نهایی، به معادله اوایلر مصرف می‌رسیم :

$$1 = E_t \left[ \beta \left( \frac{C_{t+1}}{C_t} \right)^{-\sigma_C} \frac{H_{C,t+1}}{H_{C,t}} \frac{1+i_t}{\Pi_{t+1}} \right]$$

تفسیر اقتصادی: این معادله کلیدی بیان می‌کند که خانوار، مصرف امروز خود را تا جایی کاهش (و پس‌انداز را افزایش) می‌دهد که فایده انتظاری آن در آینده (با در نظر گرفتن نرخ بهره حقیقی و تغییرات در مطلوبیت ناشی از شوک سلامت) دقیقاً با هزینه آن (صرف نظر کردن از مطلوبیت مصرف امروز) برابر شود.

۲.۴.۱.۱. معادله عرضه نیروی کار (تبادل کار-فراغت) این معادله، تصمیم خانوار برای انتخاب بین کار (و کسب درآمد) و فراغت را نشان می‌دهد.

1. برای استخراج این معادله، شرط مرتبه اول برای نیروی کار را بازنویسی می‌کنیم :

$$\lambda_t \frac{W_t}{P_t} = \mu_L L_t^\phi \quad (ج)$$

2. سپس، مقدار  $\lambda_t$  را از شرط مرتبه اول مصرف (رابطه الف) در معادله (ج) جایگذاری می‌کنیم :

$$(H_{C,t} C_t^{-\sigma_C}) \frac{W_t}{P_t} = \mu_L L_t^\phi$$

3. با بازآرایی، به معادله نهایی عرضه نیروی کار می‌رسیم :

$$\frac{\mu_L L_t^\phi}{H_{C,t} C_t^{-\sigma_C}} = \frac{W_t}{P_t}$$

تفسیر اقتصادی: سمت چپ این معادله، نرخ نهایی جانشینی<sup>۱</sup> بین فراغت و مصرف است (مطلوبیت نهایی فراغت تقسیم بر مطلوبیت نهایی مصرف) و سمت راست، دستمزد حقیقی  $(w_t = W_t/P_t)$  می‌باشد. این معادله بیانگر آن است که خانوار تا جایی کار می‌کند که مطلوبیت نسبی فراغت در مقایسه با مصرف، با هزینه فرصت آن یعنی دستمزد حقیقی، برابر شود.

۲.۵.۱.۱. استخراج رسمی معادله سرمایه‌گذاری و Tobin's Q

استخراج کاملاً رسمی پویایی‌های سرمایه‌گذاری نیازمند در نظر گرفتن همزمان تصمیم برای سرمایه‌گذاری  $(I_{K,t})$  و موجودی سرمایه در دوره بعد  $(K_{t+1})$  است. این کار از طریق افزودن قید انباشت سرمایه به لاگرانژین با یک ضریب لاگرانژ جدید  $(q_t \lambda_t)$  انجام می‌شود.  $q_t$  که به عنوان Tobin's Q شناخته می‌شود، قیمت سایه‌ای یا ارزش یک واحد سرمایه نصب شده به نسبت هزینه جایگزینی آن است.

فرآیند کامل مشتق‌گیری منجر به دو شرط مرتبه اول کلیدی می‌شود که در ضمیمه مقاله (Chan (2022) نیز آمده است:

1. شرط بهینگی برای سرمایه‌گذاری  $(I_{K,t})$ : این شرط بیان می‌کند که هزینه نهایی ایجاد یک واحد سرمایه جدید (که برابر با ۱ واحد کالای مصرفی به علاوه هزینه‌های تعدیل است) باید با ارزش سایه‌ای آن  $(q_t)$  برابر باشد.

<sup>1</sup> MRS

2. شرط بهینگی برای سرمایه  $(K_{t+1})$ : این شرط، پویایی خود  $q_t$  را در طول زمان توصیف می‌کند و نشان می‌دهد ارزش سرمایه امروز به بازدهی انتظاری آن در آینده وابسته است.

این دو معادله به ترتیب معادل معادلات (29) و (28) در ضمیمه مقاله Chan (2022) هستند.

$$q_t = E_t \frac{\beta \lambda_{t+1}}{\lambda_t} r_{K,t+1} + (1 - \delta_K) E_t \frac{\beta \lambda_{t+1}}{\lambda_t} q_{t+1} \quad (28)$$

$$1 - q_t \left[ 1 - \Omega \left( \frac{I_{K,t}}{I_{K,t-1}} \right) - \Omega' \left( \frac{I_{K,t}}{I_{K,t-1}} \right) \frac{I_{K,t}}{I_{K,t-1}} \right] + E_t Q_{t,t+1} q_{t+1} \Omega' \left( \frac{I_{K,t+1}}{I_{K,t}} \right) \left( \frac{I_{K,t+1}}{I_{K,t}} \right)^2 \quad (29)$$

#### ۱.۲.۱. مسئله بنگاه

##### ۱.۱.۲.۱ بیان دقیق مسئله بنگاه

در سمت تولید اقتصاد، یک بنگاه نماینده وجود دارد که در یک بازار رقابتی فعالیت می‌کند. هدف این بنگاه، انتخاب میزان بهینه عوامل تولید یعنی نیروی کار  $(L_t)$  و سرمایه  $(K_t)$  در هر دوره است تا سود دوره‌ای خود را حداکثر کند.

تکنولوژی تولید (قید): این بنگاه برای تولید محصول نهایی  $(Y_t)$  از تکنولوژی تولید کاب-داگلاس استفاده می‌کند. این تابع تولید تحت تأثیر شوک بهره‌وری کل عوامل  $(A_t)$  و همچنین شوک بیولوژیک (از طریق تأثیر بر نیروی کار) قرار دارد. تابع تولید به صورت زیر است:

$$Y_t = A_t K_t^\alpha (H_{L,t} \times L_t)^{1-\alpha}$$

در این تابع،  $H_{L,t}$  یک پارامتر کلیدی است که تأثیر شوک بیولوژیک بر عرضه مؤثر نیروی کار را مدل‌سازی می‌کند. اگر  $H_{L,t} = 1$  باشد، هیچ افتی در عرضه کار رخ نداده است؛ اما اگر  $H_{L,t} < 1$  باشد، بخشی از نیروی کار به دلیل بیماری یا قرنطینه غایب است یا بهره‌وری آن کاهش یافته است. این پارامتر، یکی از کانال‌های اصلی انتقال شوک سلامت به بخش حقیقی اقتصاد در مدل ما است.

تعریف متغیرها و پارامترها:

- $Y_t$ : تولید نهایی حقیقی
- $K_t$ : موجودی سرمایه استخدام شده توسط بنگاه
- $L_t$ : نیروی کار استخدام شده توسط بنگاه



•  $A_t$  : بهره‌وری کل عوامل<sup>۱</sup>

•  $\alpha$ : سهم سرمایه در تولید (پارامتر تکنولوژی)

•  $H_{L,t}$ : تعدیل گر بهره‌وری نیروی کار (وابسته به شوک بیولوژیک)

در گام بعدی، تابع سود بنگاه را تشکیل داده و با مشتق‌گیری از آن، تقاضای بهینه بنگاه برای نیروی کار و سرمایه را استخراج خواهیم کرد.

### ۲.۲.۱. تعریف تابع سود و مسئله بهینه‌سازی

مسئله بهینه‌سازی بنگاه، انتخاب مقادیر نیروی کار ( $L_t$ ) و سرمایه ( $K_t$ ) است که تابع سود دوره‌ای ( $Profit_t$ ) را حداکثر کند. تابع سود برابر است با تفاوت بین درآمد کل بنگاه (که از فروش محصول  $Y_t$  به قیمت  $P_t$  به دست می‌آید) و هزینه‌های کل آن (هزینه اسمی نیروی کار  $W_t L_t$  و هزینه اسمی اجاره سرمایه  $R_{K,t} K_t$ ).

بنابراین، تابع سود به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Profit_t = P_t Y_t - W_t L_t - R_{K,t} K_t$$

با جایگذاری تابع تولید (قید تکنولوژی بنگاه) در عبارت فوق، مسئله بهینه‌سازی به شکل زیر در می‌آید که در آن بنگاه متغیرهای  $L_t$  و  $K_t$  را انتخاب می‌کند:

$$\max_{L_t, K_t} \{ P_t [A_t K_t^\alpha (H_{L,t} L_t)^{1-\alpha}] - W_t L_t - R_{K,t} K_t \}$$

در گام بعدی، با مشتق‌گیری از این تابع سود نسبت به  $L_t$  و  $K_t$  و برابر قرار دادن آنها با صفر، تقاضای بهینه بنگاه برای هر یک از عوامل تولید را به دست خواهیم آورد.

### ۳.۲.۱. استخراج شرایط مرتبه اول بنگاه

برای یافتن سطح بهینه استخدام نیروی کار و سرمایه، از تابع سود که در بخش قبل تعریف شد، نسبت به  $L_t$  و  $K_t$  مشتق جزئی گرفته و برابر با صفر قرار می‌دهیم.

<sup>۱</sup> TFP

۱.۳.۲.۱. شرط بهینگی برای نیروی کار ( $L_t$ ) مشتق تابع سود نسبت به نیروی کار به صورت زیر است :

$$\frac{\partial \text{Profit}_t}{\partial L_t} = P_t [A_t K_t^\alpha (1 - \alpha) (H_{L,t} L_t)^{-\alpha} H_{L,t}] - W_t = 0$$

با بازآرایی این عبارت، به رابطه زیر می‌رسیم :

$$P_t \cdot \underbrace{(1 - \alpha) A_t K_t^\alpha (H_{L,t} L_t)^{-\alpha} H_{L,t}}_{\text{MPL (محصول نهایی نیروی کار)}} = W_t$$

اگر طرفین را بر سطح قیمت‌ها ( $P_t$ ) تقسیم کنیم، شرط بهینگی به شکل حقیقی خود در می‌آید:

$$\frac{W_t}{P_t} = \text{MPL}_t$$

تفسیر اقتصادی : این شرط بیان می‌کند که بنگاه سودگر، نیروی کار را تا جایی استخدام می‌کند که محصول نهایی آخرین واحد کارگر<sup>۱</sup> دقیقاً با دستمزد حقیقی ( $w_t = W_t/P_t$ ) برابر شود.

۲.۳.۲.۱. شرط بهینگی برای سرمایه ( $K_t$ ) به طور مشابه، مشتق تابع سود نسبت به سرمایه به صورت زیر است :

$$\frac{\partial \text{Profit}_t}{\partial K_t} = P_t [A_t \alpha K_t^{\alpha-1} (H_{L,t} L_t)^{1-\alpha}] - R_{K,t} = 0$$

که می‌توان آن را به این صورت بازنویسی کرد :

$$P_t \cdot \underbrace{\alpha A_t K_t^{\alpha-1} (H_{L,t} L_t)^{1-\alpha}}_{\text{MPK (محصول نهایی سرمایه)}} = R_{K,t}$$

$$\frac{R_{K,t}}{P_t} = \text{MPK}_t$$

---

<sup>۱</sup> MPL

تفسیر اقتصادی: این شرط نیز بیان می‌کند که بنگاه تا جایی سرمایه‌آجاره می‌کند که محصول نهایی آخرین واحد سرمایه<sup>۱</sup> با نرخ آجاره حقیقی سرمایه  $(r_{k,t} = R_{K,t}/P_t)$  برابر گردد.

#### ۴.۲.۱. استخراج منحنی فیلیپس نیوکینزی (چسبندگی قیمت)

معادله پویایی تورم در مدل، یا همان منحنی فیلیپس نیوکینزی، از مسئله بهینه‌سازی بنگاه‌های با رقابت انحصاری که با چسبندگی قیمت به سبک کالوو<sup>۲</sup> روبرو هستند، استخراج می‌شود. در این چارچوب، هر بنگاه در هر دوره تنها با احتمال ثابت  $(1-v)$  می‌تواند قیمت خود را مجدداً تنظیم کند. بنابراین، بنگاهی که شانس قیمت‌گذاری مجدد پیدا می‌کند، یک قیمت بهینه جدید  $(P_t^*)$  را انتخاب می‌کند تا ارزش فعلی سودهای انتظاری آتی خود را حداکثر نماید. شرط مرتبه اول این مسئله بهینه‌سازی نشان می‌دهد که قیمت بهینه، یک نشاط<sup>۳</sup> ثابت بر روی میانگین وزنی هزینه‌های نهایی حقیقی انتظاری آینده است.

فرآیند لگاریتم-خطی‌سازی این شرط بهینگی برای رسیدن به منحنی فیلیپس نیوکینزی، از نظر جبری طولانی است. جزئیات کامل این فرآیند در منابع استاندارد اقتصاد کلان نیوکینزی (مانند Galí, 2015) و به طور خلاصه در ضمیمه مقاله Chan (2022) تشریح شده است. نتیجه نهایی این فرآیند، معادله‌ای است که تورم امروز را به تورم انتظاری فردا و هزینه نهایی حقیقی مرتبط می‌سازد و به صورت زیر است:

$$\hat{\pi}_t = \beta E_t[\hat{\pi}_{t+1}] + \kappa \cdot \hat{m}c_t$$

فاز سوم: تکمیل و بستن مدل

تا اینجا معادلات رفتاری عاملان اصلی اقتصاد (خانوار و بنگاه) را از اصول اولیه استخراج کردیم. برای اینکه مدل کامل و قابل حل باشد، باید اجزای باقی‌مانده شامل سیاست پولی، بخش اپیدمیولوژیک و شرط تعادل کل اقتصاد را نیز به سیستم معادلات اضافه کنیم.

#### ۱.۳.۱. سیستم نهایی معادلات ساختاری مدل

در ادامه، مجموعه کامل معادلات ساختاری غیرخطی مدل را که رفتار کل اقتصاد را توصیف می‌کنند، ارائه می‌دهیم.

۱. سیاست پولی (قاعده تیلور تعدیل‌شده): بانک مرکزی نرخ بهره اسمی  $(i_t)$  را بر اساس یک قاعده تیلور تعدیل‌شده تنظیم می‌کند که به تورم، شکاف تولید و شدت همه‌گیری (از طریق شاخص CFR) واکنش نشان می‌دهد:

<sup>1</sup> MPK

<sup>2</sup> Calvo pricing

<sup>3</sup> markup

$$\hat{i}_t = \rho_i \hat{i}_{t-1} + (1 - \rho_i)(\alpha_\pi \hat{\pi}_t + \alpha_y \hat{y}_t + \alpha_{CFR} \hat{cfr}_t) + \hat{\epsilon}_{i,t}$$

۲. بخش اپیدمیولوژیک (مدل SIR): پویایی شیوع بیماری توسط معادلات استاندارد SIR توصیف می‌شود:

$$S_{t+1} = S_t(1 - a_1 I_t)$$

$$I_{t+1} = I_t + a_1 S_t I_t - a_2 I_t$$

$$R_{t+1} = R_t + a_2 I_t$$

$$S_t + I_t + R_t = 1$$

۳. فرآیندهای شوک‌های برون‌زا: شوک‌های بهره‌وری و سلامت به صورت فرآیندهای خودرگرسیو مرتبه اول (AR(1)) مدل‌سازی می‌شوند:

$$\hat{a}_t = \rho_a \hat{a}_{t-1} + \hat{\epsilon}_{a,t}$$

$$\hat{cfr}_t = \rho_{CFR} \hat{cfr}_{t-1} + \hat{\epsilon}_{CFR,t}$$

۴. شرط تسویه بازار (تعادل کل اقتصاد): در نهایت، شرط تعادل در بازار کالا بیان می‌کند که کل تولید ( $Y_t$ ) باید برابر با مجموع مصارف نهایی یعنی مصرف ( $C_t$ ) و سرمایه‌گذاری ( $I_{K,t}$ ) باشد.

$$Y_t = C_t + I_{K,t}$$

با در کنار هم قرار دادن این معادلات و معادلات رفتاری استخراج شده برای خانوار و بنگاه، مدل کامل می‌شود. گام نهایی برای حل عددی، خطی‌سازی این سیستم معادلات حول نقطه تعادل باثبات آن است.

۲.۱.۳.۱. معادلات اتصال و کانال‌های انتقال شوک

برای اینکه پویایی‌های بخش اپیدمیولوژیک<sup>۱</sup> بر بخش اقتصاد کلان<sup>۲</sup> تأثیر بگذارد، باید یک پل ارتباطی ریاضی بین این دو تعریف شود. در مدل ما، این ارتباط از طریق چند "کانال انتقال شوک" صورت می‌گیرد که مستقیماً به خروجی کلیدی مدل SIR، یعنی نسبت جمعیت مبتلا ( $I_t$ )، وابسته هستند. این معادلات به شرح زیر هستند:

۱. کانال ترجیحات مصرف (شوک سمت تقاضا): این معادله مدل می‌کند که چگونه همه‌گیری، از طریق ایجاد ترس و عدم اطمینان، مطلوبیت نهایی مصرف خانوارها را کاهش می‌دهد و آنها را به کاهش مخارج ترغیب می‌کند. این اثر از طریق تعدیل گر مطلوبیت ( $H_{C,t}$ ) وارد تابع مطلوبیت خانوار می‌شود:

$$\frac{H_{C,t}}{H_C} - 1 = -\gamma_C a_0 I_t$$

۲. کانال بهره‌وری کل عوامل<sup>۳</sup> (شوک سمت عرضه): این معادله مدل می‌کند که چگونه همه‌گیری می‌تواند با ایجاد اختلال در زنجیره‌های تأمین، محدودیت‌های لجستیکی یا کاهش کارایی فرآیندهای تولید، بهره‌وری کل اقتصاد را کاهش دهد. این اثر مستقیماً بر متغیر  $A_t$  در تابع تولید بنگاه تأثیر می‌گذارد:

$$\frac{A_t}{A} - 1 = -\gamma_A a_0 I_t$$

۳. کانال عدم مطلوبیت نیروی کار (مرتبط با سیاست‌های مهار): این کانال، هزینه اقتصادی ناشی از سیاست‌های مهار (مانند قرنطینه) را مدل‌سازی می‌کند. فرض بر این است که یک سیاست مهار سختگیرانه‌تر، با افزایش عدم مطلوبیت کار (مثلاً به دلیل دشواری‌های دورکاری یا محدودیت‌های تردد)، عرضه نیروی کار را کاهش می‌دهد. این اثر از طریق تعدیل گر  $H_{L,t}$  در تابع مطلوبیت خانوار وارد می‌شود:

$$H_{L,t} = 1 - \gamma_L \frac{a_{0,t} - a_0}{a_0}$$

در اینجا  $a_{0,t}$  نشان‌دهنده شدت سیاست مهار در زمان  $t$  است.

این معادلات اتصال تضمین می‌کنند که دینامیک همه‌گیری، که توسط مدل SIR شبیه‌سازی می‌شود، به صورت درون‌زا به متغیرهای کلیدی مدل DSGE منتقل شده و اثرات آن بر اقتصاد قابل تحلیل باشد.

تأثیر بر سیاست پولی (از طریق CFR):

<sup>1</sup> SIR

<sup>2</sup> DSGE

<sup>3</sup> TFP

$$CFR_t = \frac{Deaths_t}{Cases_t}$$

$$CFR_t = \rho_{CFR} CFR_{t-1} + \epsilon_{CFR,t}$$

بخش ۴: محاسبه حالت پایدار<sup>۱</sup>

حالت پایدار (یا تعادل باثبات)، نقطه تعادل بلندمدت مدل در غیاب هرگونه شوک است که در آن تمام متغیرها مقادیر ثابتی دارند. محاسبه این مقادیر یک گام ضروری قبل از خطی‌سازی مدل است، زیرا خطی‌سازی در واقع تقریب زدن رفتار مدل در اطراف همین نقطه است.

فرآیند محاسبه حالت پایدار به صورت زیر است:

1. تنظیم سیستم معادلات: مجموعه کامل معادلات ساختاری غیرخطی مدل (شامل معادلات اوایلر، عرضه نیروی کار، تقاضای عوامل تولید، انباشت سرمایه، قید منابع و غیره) را در نظر می‌گیریم.
  2. حذف پویایی و شوک‌ها: در تمام معادلات، اندیس‌های زمان را حذف می‌کنیم (مثلاً  $C_t = C_{t+1} = C$ ) و تمام متغیرهای شوک را برابر با مقدار میانگینشان (مقدار صفر برای شوک‌های لگاریتمی) قرار می‌دهیم.
  3. حل سیستم جبری: در این مرحله یک سیستم معادلات جبری غیرخطی داریم که باید برای یافتن مقادیر حالت پایدار متغیرها ( $C, K, L, W, Y$ ) حل شود. این فرآیند معمولاً به صورت تحلیلی و مرحله‌ای انجام می‌شود تا روابط جبری بین متغیرهای حالت پایدار به دست آید.
- مقادیر عددی حالت پایدار که از این فرآیند به دست می‌آیند، هم برای کالیبراسیون برخی پارامترها و هم به عنوان نقطه‌ای که مدل حول آن خطی‌سازی می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

#### ۱.۴.۱. سیستم نهایی معادلات خطی‌شده

سیستم معادلات ساختاری که در بخش قبل معرفی شد، یک سیستم دینامیک غیرخطی است. حل تحلیلی چنین سیستمی عموماً امکان‌پذیر نیست. بنابراین، برای حل عددی و شبیه‌سازی مدل، از روش استاندارد لگاریتم-خطی‌سازی<sup>۲</sup> حول نقطه تعادل باثبات<sup>۳</sup>

<sup>1</sup> Steady State

<sup>2</sup> Log-linearization

<sup>3</sup> steady state

استفاده می‌کنیم. در این روش، هر متغیر به صورت درصد انحراف از مقدار تعادل باثبات خود بیان می‌شود. برای مثال،  $\hat{x}_t$  نشان‌دهنده انحراف لگاریتمی متغیر  $X_t$  از حالت باثبات آن  $(X^-)$  است:  $\hat{x}_t = \log(X_t) - \log(X^-)$ .

سیستم کامل و نهایی معادلات خطی شده که آماده ورود به حل‌کننده است، به شرح زیر می‌باشد:

1. معادله اوایلر مصرف خطی شده:

$$\hat{c}_t = E_t[\hat{c}_{t+1}] - \frac{1}{\sigma_C} (\hat{i}_t - E_t[\hat{\pi}_{t+1}] - (\hat{h}_{C,t} - E_t[\hat{h}_{C,t+1}]))$$

2. معادله سرمایه‌گذاری خطی شده:

$$\hat{i}_{k,t} = \frac{1}{\Omega} \hat{q}_t$$

3. معادله پویایی Tobin's Q (خطی شده):

$$\hat{q}_t = \beta E_t[\hat{q}_{t+1}] + (1 - \beta(1 - \delta_K)) E_t[\hat{r}_{K,t+1}] - \hat{i}_t + E_t[\hat{\pi}_{t+1}]$$

4. منحنی فیلپس نیوکینزی (تورم):

$$\hat{\pi}_t = \beta E_t[\hat{\pi}_{t+1}] + \kappa \cdot \hat{m}c_t$$

5. عرضه نیروی کار خطی شده:

$$\sigma_C \hat{c}_t + \phi \hat{l}_t = \hat{w}_t + \hat{h}_{C,t}$$

6. تقاضای نیروی کار خطی شده:

$$\hat{w}_t = \hat{a}_t + \alpha \hat{k}_t - \alpha \hat{l}_t + (1 - \alpha) \hat{h}_{L,t}$$

7. تقاضای سرمایه خطی شده:

$$\hat{r}_{K,t} = \hat{a}_t + (1 - \alpha)(\hat{l}_t + \hat{h}_{L,t}) - (1 - \alpha) \hat{k}_t$$

8. تابع تولید خطی شده:

$$\hat{y}_t = \hat{a}_t + \alpha \hat{k}_t + (1 - \alpha)(\hat{h}_{L,t} + \hat{l}_t)$$

9. معادله انباشت سرمایه خطی شده:

$$\hat{k}_{t+1} = (1 - \delta_K)\hat{k}_t + \delta_K \hat{i}_{k,t}$$

10. قید منابع کل اقتصاد خطی شده:

$$\hat{y}_t = c_y \hat{c}_t + i_y \hat{i}_{k,t}$$

11. قاعده سیاست پولی تیلور (خطی شده):

$$\hat{i}_t = \rho_i \hat{i}_{t-1} + (1 - \rho_i)(\alpha_\pi \hat{\pi}_t + \alpha_y \hat{y}_t + \alpha_{CFR} \hat{cfr}_t) + \hat{\epsilon}_{i,t}$$

جمع‌بندی نهایی: این سیستم معادلات خطی، تقریب مرتبه اول مدل در اطراف نقطه تعادل باثبات است. این سیستم اکنون آماده پیاده‌سازی مستقیم در پایتون برای شبیه‌سازی توابع واکنش آنی<sup>1</sup> و تحلیل‌های سیاستی است.

## بخش نوآوری: ورود شدت بحران سلامت (CFR) در قاعده سیاست پولی

### 1. توجه اقتصادی

یکی از ابعاد کمتر پرداخته شده در ادبیات اقتصاد کلان اپیدمی‌ها، نقش مستقیم شدت بحران سلامت در شکل‌دهی به رفتار اقتصادی کارگزاران است. تجربه‌ی کووید-۱۹ نشان داد که حتی در غیاب ابتلای مستقیم، خانوارها و بنگاه‌ها رفتار خود را به دلیل افزایش ریسک ادراک شده و محدودیت‌های نهادی تغییر می‌دهند. از منظر رفتاری، در دوران اپیدمی حتی افراد سالم نیز به دلیل ترس از ابتلا، الزامات دورکاری، تعطیلی مشاغل حضوری، و محدودیت‌های جابجایی، تمایل کمتری به مشارکت در بازار کار دارند. این وضعیت به‌طور معادل به معنای افزایش هزینه ذهنی عرضه نیروی کار است. در چارچوب نظری مطلوبیت بین‌زمانی، این هزینه به صورت افزایش در «عدم مطلوبیت کار» ظاهر می‌شود. بنابراین، منطقی است که شدت اپیدمی (CFR یا سهم مبتلایان I\_t) به‌طور مستقیم وارد تابع مطلوبیت خانوار یا قاعده سیاست پولی بانک مرکزی شود.

از منظر سیاست‌گذاری نیز بحران سلامت، علاوه بر اثرات مستقیم بر بهره‌وری و تقاضا، به‌عنوان یک متغیر وضعیت کلان عمل می‌کند. در شرایط اوج اپیدمی، سیاست‌گذاران پولی در بسیاری از کشورها به‌طور آشکار واکنش نشان داده‌اند: کاهش سریع نرخ بهره، اتخاذ سیاست‌های تسهیل کمی و بسته‌های اعتباری حمایتی. این واکنش‌ها مستقل از مسیر متعارف تورم و شکاف تولید، به‌طور خاص به شدت بحران سلامت وابسته بوده‌اند.

<sup>1</sup> IRFs



بدین ترتیب، وارد کردن CFR در قاعده سیاست پولی، در حقیقت بازتاب نهادی رفتار واقعی بانک‌های مرکزی در شرایط اپیدمی است. این نوآوری دو پیامد کلیدی دارد:

1. از منظر نظری، یک کانال انتقال جدید برای شوک‌های سلامت تعریف می‌کند: *کانال سلامت-پولی*. در این کانال، تغییرات وضعیت اپیدمی مستقیماً بر مسیر نرخ بهره و از آن طریق بر مصرف، سرمایه‌گذاری و تولید اثر می‌گذارد.
2. از منظر تجربی، امکان مقایسه‌ی بین‌کشوری فراهم می‌شود. تفاوت در شدت واکنش بانک مرکزی به CFR (پارامتر  $\alpha_{CFR}$ ) بیانگر تفاوت‌های نهادی و ساختاری است. برای مثال، در کشورهایی با استقلال پایین بانک مرکزی (مانند ایران)، ضریب واکنش احتمالاً کوچک‌تر است، در حالی که در کشورهایی با سیاست پولی فعال‌تر (مانند چین) این ضریب بزرگ‌تر خواهد بود.

بنابراین، این نوآوری هم از منظر رفتاری (واکنش خانوارها به ریسک سلامت) و هم از منظر نهادی (واکنش بانک مرکزی به شدت اپیدمی) توجیه نظری و تجربی محکمی دارد و می‌تواند تبیین مدل را از سطح تکرار نتایج مقاله‌ی بیس، به سطح تحلیل دکتری ارتقا دهد.

## 2. قاعده سیاست پولی در نسخه نوآوری

با افزودن واکنش به CFR، قاعده سیاست پولی به شکل زیر تغییر می‌کند:

نسخه خطی (سطح CFR):

$$i_t = \rho_i i_{t-1} + (1 - \rho_i) [\tau_\pi (\pi_t - \pi^*) + \tau_y \hat{y}_t] + \alpha_{CFR} CFR_t + \varepsilon_{i,t}.$$

نسخه تفاضلی (تغییرات CFR):

$$\dot{i}_t = \rho_i \dot{i}_{t-1} + (1 - \rho_i) [\tau_\pi (\pi_t - \pi^*) + \tau_y \hat{y}_t] + \alpha_{CFR} (CFR_t - CFR_{t-1}) + \varepsilon_{i,t}.$$

نسخه رژیم سوئیچ (آستانه‌ای):

$$i_t = \rho_i i_{t-1} + (1 - \rho_i) [\tau_\pi (\pi_t - \pi^*) + \tau_y \hat{y}_t] + f(CFR_t) + \varepsilon_{i,t},$$

که در آن:

$$f(CFR_t) = \begin{cases} \alpha_1 \cdot CFR_t & \text{اگر } CFR_t \leq \bar{c} \\ \alpha_2 \cdot CFR_t & \text{اگر } CFR_t > \bar{c} \end{cases}$$

#### ۴. فرآیند CFR

برای سازگاری، CFR همچنان به صورت یک فرآیند خودرگرسیو مدل سازی می شود:

$$CFR_t = \rho_{CFR} CFR_{t-1} + \varepsilon_{CFR,t}.$$

#### ۵. تغییر در شرایط مرتبه اول (FOC ها)

شرایط مرتبه اول خانوار و بنگاه بدون تغییر باقی می ماند. تنها جایی که اثر نوآوری ظاهر می شود، در شرط اوایلر مصرف و سایر روابطی است که نرخ بهره اسمی ( $i_t$ ) در آن حضور دارد. به عنوان مثال:

معادله اوایلر مصرف (نسخه نوآوری):

با توجه به تغییر قاعده پولی، نرخ بهره  $i_t$  اکنون تابعی از CFR است:

$$1 = E_t \left[ \beta \frac{C_t^{-\sigma_C}}{C_{t+1}^{-\sigma_C}} \frac{1 + \rho_i i_t + (1 - \rho_i)(\tau_\pi(\pi_t - \pi^*) + \tau_y \hat{y}_t) + \alpha_{CFR} CFR_t}{\pi_{t+1}} \right].$$

این معادله نشان می دهد که مطلوبیت بین زمانی خانوارها اکنون به طور غیرمستقیم به شدت بحران سلامت وابسته است.

#### ۶. تغییر در فرم خطی سازی

پس از خطی سازی حول حالت پایدار، قاعده پولی به صورت زیر وارد بلوک معادلات خطی شده می شود:

$$\hat{i}_t = \rho_i \hat{i}_{t-1} + (1 - \rho_i) [\tau_\pi \hat{\pi}_t + \tau_y \hat{y}_t] + \alpha_{CFR} \hat{CFR}_t + \varepsilon_{i,t}.$$

#### ۷. جمع بندی نوآوری

## بخش ۲: روش‌شناسی کالیبراسیون و مقادیر پارامترها

۱.۲. مقدمه‌ای روش‌شناختی بر کالیبراسیون مدل‌های DSGE برای اقتصادهای نوظهور

تدوین یک مدل تعادل عمومی پویای تصادفی<sup>۱</sup> که بتواند به شکلی معتبر پویایی‌های اقتصاد کلان را شبیه‌سازی کند، نیازمند یک فرآیند دقیق و روش‌مند برای تعیین مقادیر پارامترهای ساختاری آن است. این فرآیند، که از آن با عنوان کالیبراسیون یا برآورد یاد می‌شود، به‌ویژه در مورد اقتصادهای نوظهور مانند ایران، هند و چین با چالش‌ها و ملاحظات منحصربه‌فردی روبرو است. موفقیت مدل در بازتولید حقایق آشکار شده<sup>۲</sup> و ارائه تحلیل‌های سیاستی قابل اتکا، به شدت به کیفیت این فرآیند وابسته است.

سلسله مراتب انتخاب پارامتر: از برآورد مستقیم تا معیارهای ادبیات

در عمل، انتخاب مقادیر پارامترها از یک سلسله مراتب مشخص از اعتبار پیروی می‌کند. سطح طلایی، استفاده از پارامترهایی است که مستقیماً در یک مدل با ساختار مشابه برای کشور هدف برآورد شده‌اند. سطح دوم، کالیبراسیون بر اساس مطالعات خاص کشور است. سطح سوم، کالیبراسیون بر اساس نسبت‌های حالت پایدار<sup>۳</sup> مشاهده‌شده در داده‌های حساب‌های ملی است. سطح چهارم، استفاده از مقادیر "استاندارد" پذیرفته‌شده در ادبیات بین‌المللی DSGE است. نهایتاً، در صورتی که برای یک پارامتر خاص هیچ مقداری در ادبیات یافت نشود، استراتژی برتر، پیشنهاد یک روش استاندارد برای برآورد آن است.

مواجهه با ناهمگونی ساختاری: اهمیت اصطکاک‌های خاص کشور

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مدل‌سازی اقتصادهای نوظهور، این واقعیت است که مدل‌های استاندارد نئو-کینزی ممکن است به دلیل نادیده گرفتن برخی ویژگی‌های ساختاری کلیدی، دچار سوء تصریح<sup>۴</sup> باشند.

اصطکاک‌های مالی و شتاب‌دهنده مالی: برای مدل‌های هند و چین بسیار حائز اهمیت است.

بخش غیررسمی: وجود یک بخش غیررسمی بزرگ، به‌ویژه در اقتصاد هند، پویایی‌های بازار کار و مکانیسم‌های انتقال سیاست پولی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

تسلط بخش نفت: برای کشورهای صادرکننده نفت مانند ایران، نادیده گرفتن بخش نفت به معنای چشم‌پوشی از منبع اصلی شوک‌های برون‌زا است.

<sup>1</sup> DSGE

<sup>2</sup> stylized facts

<sup>3</sup> steady-state ratios

<sup>4</sup> misspecification

این ملاحظات نشان می‌دهد که فرآیند کالیبراسیون نیازمند درک عمیق از ساختار اقتصادی کشور هدف و مفروضات نظری مدل است.

## ۲.۲. پرونده پارامترها برای جمهوری اسلامی ایران

کالیبراسیون یک مدل DSGE برای اقتصاد ایران با چالش‌های منحصربه‌فردی روبرو است. گزارش‌های نهادهای بین‌المللی مانند IMF و بانک جهانی به طور مداوم به موانع ساختاری، کیفیت و در دسترس بودن داده‌ها، و تأثیرات تحریم‌های اقتصادی اشاره کرده‌اند. در نتیجه، برای بسیاری از پارامترهای مورد نیاز، استراتژی اصلی بر استفاده از مقادیر استاندارد ادبیات و پیشنهاد روش‌های برآورد استوار خواهد بود.

پارامترهای خانوار و بنگاه:

$\beta$  (عامل تنزیل): مقدار استاندارد فصلی 0.99 پیشنهاد می‌شود.

$\sigma_C$  (کشش جانشینی مصرف): مقدار 1.0 (مطلوبیت لگاریتمی) به عنوان معیار پایه پیشنهاد می‌شود.

$\varphi$  (کشش معکوس عرضه نیروی کار): مقدار معیار 1.0 پیشنهاد می‌شود.

$\alpha$  (سهم سرمایه): محدوده 0.3 الی 0.4 پیشنهاد می‌شود که با بسیاری از اقتصادها سازگار است.

$\delta_K$  (نرخ استهلاک سرمایه): مقدار استاندارد فصلی 0.025 پیشنهاد می‌شود.

پویایی‌های سیاست پولی:

استراتژی جایگزین: برآورد قاعده تیلور با استفاده از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته<sup>۱</sup>: رویکرد استاندارد برای برآورد قواعد سیاست پولی پیش‌نگر، استفاده از GMM است. این نیازمند داده‌های سری زمانی فصلی از بانک مرکزی ایران و مرکز آمار ایران است. پارامترهای فرآیندهای شوک: پیشنهاد می‌شود از توزیع‌های پیشین استاندارد در ادبیات بیزی استفاده شود.

## ۳.۲. پرونده پارامترها برای جمهوری هند

<sup>1</sup> GMM

ادبیات مدل‌سازی DSGE برای اقتصاد هند در حال رشد است و مطالعات متعددی از روش‌های برآورد بیزی برای تخمین پارامترها با استفاده از داده‌های اقتصاد کلان هند استفاده کرده‌اند.

مقادیر کالیبره و برآورد شده:

$\beta$ : مطالعه شارما و بهرا (2022) این پارامتر را برابر با 0.99 کالیبره می‌کند.

$\sigma_C$ : مقدار پایه 1.0 یک نقطه شروع منطقی است.

$\phi$ : مطالعه کومار (2023) مقداری معادل 1.0 را در نظر می‌گیرد.

$\alpha$ : بر اساس نسبت‌های حالت پایدار، یک مقدار در محدوده 0.30 الی 0.35 منطقی به نظر می‌رسد.

$\delta_K$ : شارما و بهرا (2022) این پارامتر را برابر با 0.025 کالیبره می‌کنند.

سیاست پولی و فرآیندهای شوک:

پارامترهای قاعده تیلور: مطالعاتی مانند گویال (2017) و شارما و بهرا (2022) با استفاده از روش‌های بیزی این پارامترها را برآورد کرده‌اند.

پارامترهای فرآیندهای شوک: این پارامترها نیز به طور مستقیم از برآوردهای پسین مطالعات بیزی DSGE برای هند استخراج می‌شوند.

۴.۲. پرونده پارامترها برای جمهوری خلق چین

ادبیات مدل‌سازی DSGE برای چین گسترده است و منابع غنی برای استخراج پارامترهای کالیبره شده فراهم می‌کند.

مقادیر کالیبره و برآورد شده:

$\beta$ : مقدار پایه 0.98 پیشنهاد می‌شود.

$\sigma_C$ : مقدار پایه 1.0 یک نقطه شروع مناسب است.

$\phi$ : چن و همکاران (2021) از مقدار 2.0 استفاده می‌کنند.

$\alpha$ : با توجه به نرخ سرمایه‌گذاری بالا، چن و همکاران (2021) آن را برابر با 0.49 در نظر می‌گیرند.

$\delta_K$ : چن و همکاران (2021) از مقدار 0.025 استفاده می‌کنند.

سیاست پولی و فرآیندهای شوک:

پارامترهای قاعده تیلور: مطالعه سان (2015) یک مجموعه کامل از پارامترهای کالیبره شده ارائه می‌دهد:

$$\rho_r = 0.75, \rho_\pi = 1.01, \rho_y = 0.01.$$

پارامترهای فرآیندهای شوک: همان مطالعه مقادیری را برای شوک بهره‌وری فراهم می‌کند:

$$\rho_a = 0.5, \sigma_a = 1.30.$$

۵.۲. کالیبراسیون پیوند اپیدمیولوژیک-اقتصادی ( $\gamma_A$  و  $\gamma_C$ )

این پارامترها در ادبیات استاندارد DSGE قبل از همه‌گیری کووید-19 وجود ندارند. رایج‌ترین روش برای تعیین مقادیر آنها، کالیبراسیون از طریق تطبیق گشتاور<sup>۱</sup> است. ایده اصلی این است که این پارامترها طوری تنظیم شوند که مدل بتواند گشتاورهای آماری کلیدی مشاهده شده در داده‌های دوره همه‌گیری (مانند اوج کاهش فصلی در مصرف و تولید) را بازتولید کند.

۶.۲. ماتریس جامع کالیبراسیون پارامترها

جدول زیر یافته‌های این گزارش را به صورت یک ماتریس جامع و مقایسه‌ای خلاصه می‌کند.

منبع اصلی/توجیه	مقدار (چین)	مقدار (هند)	مقدار (ایران)	توضیح	پارامتر
(Sharma & Behera, 2022), (Chen et al., 2021)	0.98	0.99	0.99	عامل تنزیل	$\beta$
مقادیر استاندارد ادبیات	1.0 (Implicit)	~1.0-2.0	1.0-2.0	کشش مصرف	$\sigma_C$
تطبیق با $3/1 = L_{ss}$	کالیبره شود	کالیبره شود	کالیبره شود	وزن عدم مطلوبیت کار	$\mu_L$
(Chen et al., 2021)	2	~2.0	~2.0	کشش معکوس عرضه نیروی کار	$\varphi$
(Chen et al., 2021), مقایسه‌ای	0.49	~0.40	~0.40-0.45	سهم سرمایه	$\alpha$
(Sharma & Behera, 2022), (Chen et al., 2021)	0.025	0.025	0.025	نرخ استهلاک	$\delta_K$
(Sun, 2015)	0.75	یافت نشد	نیاز به برآورد	ضریب هموارسازی	$\rho_i$
(Goyal & Zimring, 2017), (Sun, 2015)	1.01	0.1326	نیاز به برآورد	واکنش به تورم	$\alpha_\pi$

<sup>1</sup> Moment-Matching

$\alpha_y$	واکنش به شکاف تولید	نیاز به برآورد	0.1825	0.01	(Goyal & Zimring, 2017), (Sun, 2015)
$\rho_a$	TFP پایداری شوک	0.95	0.9586	0.5	(Goyal & Zimring, 2017), (Sun, 2015)
$\sigma_a$	انحراف معیار شوک TFP	نیاز به برآورد	0.0075	1.3	(Goyal & Zimring, 2017), (Sun, 2015)
$\gamma_A$ $\gamma_C$	حساسیت به اپیدمی	کالیبراسیون مبتنی بر داده	کالیبراسیون مبتنی بر داده	کالیبراسیون مبتنی بر داده	روش تطبیق گشتاورها

## ۷.۲. پارامترهای مدل اپیدمیولوژیک (SIR)

برخلاف پارامترهای مدل DSGE که عمدتاً از طریق کالیبراسیون بر اساس مقالات پیشین تعیین شدند، پارامترهای بخش اپیدمیولوژیک مدل به صورت مستقیم از داده‌های واقعی استخراج می‌شوند. مدل SIR دارای دو پارامتر کلیدی است:

- $a1$  (نرخ انتقال بیماری): این پارامتر نشان‌دهنده احتمال انتقال بیماری از یک فرد مبتلا به یک فرد مستعد در واحد زمان است.
- $a2$  (نرخ بهبودی): این پارامتر نشان‌دهنده نسبت افراد مبتلا است که در واحد زمان بهبود یافته یا از چرخه بیماری خارج می‌شوند.

برای تعیین مقادیر این دو پارامتر در هر یک از کشورهای مورد مطالعه، از روش برازش عددی<sup>۱</sup> استفاده شده است. به طور مشخص، مدل SIR بر روی داده‌های واقعی روزانه کووید-۱۹ (تعداد مبتلایان فعال) برازش داده شده و مقادیر  $a1$  و  $a2$  با استفاده از روش حداقل مربعات غیرخطی<sup>۲</sup> و الگوریتم بهینه‌سازی L-BFGS-B به دست آمده‌اند.

### جمع‌بندی

این گزارش فنی، مدل SIR-DSGE را به طور کامل از منظر تئوریک (با استخراج معادلات ساختاری) و تجربی (با کالیبراسیون جامع پارامترها) مشخص کرده است. با در دست داشتن معادلات بهینگی و مقادیر پارامترها، مدل اکنون آماده ورود به مرحله بعدی پژوهش، یعنی شبیه‌سازی عددی، تحلیل توابع واکنش آنی<sup>۳</sup> و ارزیابی سناریوهای مختلف سیاستی است. توصیه اکید می‌شود که یک تحلیل حساسیت جامع برای اطمینان از استحکام نتایج نسبت به مقادیر پارامترهای کلیدی انجام شود.

<sup>1</sup> Fitting

<sup>2</sup> Non-linear Least Squares

<sup>3</sup> Impulse Response Functions