فهرست

عنوان **صفحه**

۱ -کلیات پژوهش..... ۱

۱-۱-مقدمه ۱

۱-۲-تعریف موضوع (تعریف مسئله، هدف از اجرا و کاربرد نتایج پژوهش) ۲

۱-۳-سؤالات پژوهشی ۴

۱-۴-روش پژوهش..... ۴

۱-۵-مدت زمان پژوهش ۴

۱-۶-تعریف واژه‌ها و اصطلاحات تخصصی پژوهش..... ۵

۱-۷-مراحل اجرای پژوهش..... ۶

۱-۸-خلاصه فصل..... ۷

۲- ادبیات پژوهش..... ۹

۲-۱-پیشینه ترمودینامیکی..... ۹

۲-۱-۱-قانون اول ترمودینامیک..... ۱۰

۲-۱-۲-طبقه بندی سیستم‌های ترمودینامیکی..... ۱۱

۲-۱-۳-قانون دوم ترمودینامیک..... ۱۵

۲-۱-۴-مفهوم آنتروپی و اکسرژی..... ۱۷

۲-۲-مشارکت فیزیک در علم اقتصاد..... ۲۱

۲-۲-۱-روش صوری (استعاری) ۲۲

-۲-۲-۲روش ماهوی..... ۲۵

۲-۳-نتیجه گیری و خلاصه‌ی فصل ۳۳

۳ - ارزیابی..... ۳۶

۳-۱-مقدمه: ۳۶

۳-۲-عامل اصلی رشد اقتصادی چیست؟ ۳۷

-۳-۳طراحی ریاضیاتی تابع تولید با عامل تولید انرژی.....۴۳
۳-۳-۱-نقد آیرس بر تابع لاینکس کومل.....۴۹
۳-۳-۲-ارزیابی دستاوردهای کومل و آیرس.....۵۶
۳-۴-عدم سازگاری شرایط اینادا با قوانین ترمودینامیک ۵۷
-۱-۴-۳شرایط اینادا برای نهاده‌های منابع.....۵۷
۳-۴-۲-ارزیابی دستاوردهای بام‌گارتنر: ۷۱
۳-۵-بررسی امکان رشد نامحدود فیزیکی و پایداری رشد، با توجه به بسته بودن سیستم زمین ۷۳
۳-۵-۱-حصول آنتروپی.....۷۳
۳-۵-۲-آیا رشد نامحدود از نظر فیزیکی امکان پذیر است؟..... ۸۴
۳-۵-۳-ارزیابی دستاوردهای کریساک.....۸۷
۳-۶-نتیجه گیری و خلاصه‌ی فصل ۸۸
۴-دستاوردهای پژوهش ۹۱
۴-۱-مقدمه: ۹۱
۴-۲-استخراج نتایج اقتصادی از قوانین ترمودینامیک ۹۱
۴-۳-آیا با پیچیده‌تر شدن فرآیند تولید، بازده افزایش می‌یابد؟ ۹۳
۴-۴-مقایسه‌ی مفهوم بازده (کارایی) در اقتصاد و فیزیک ۹۷
۴-۵-یک آزمایش اقتصادی از امکان پذیر بودن پایداری رشد اقتصاد جهانی..... ۹۸
۴-۶-خلاصه‌ی فصل و نتیجه‌گیری ۱۰۳
۵ -نتیجه گیری و پیشنهادها. ۱۰۵
۵-۱-مقدمه ۱۰۵
۵-۲-بررسی سؤالات پژوهشی ۱۰۶
۵-۳-نتایج پژوهش. ۱۰۷
۵-۴-پیشنهادهای پژوهشی ۱۰۸
منابع و مآخذ.....۱۰۹

فهرست روابط

عنوان **صفحه**

۱-۲۳ : $Qc < QH$ و $W + Qc = QH$ ۱۷

۲-۳-۱-۲: $wQH + QcQH = 1$ ۱۷

۳-۳-۱-۲ : $wQH = 1 - QcQH$ ۱۷

۱-۳-۳: $\frac{dy}{y} = a\frac{dk}{k} + \beta\frac{dl}{l} + \gamma\frac{de}{e} + \delta\frac{dt}{t-t_0}$ ٤٤

۲-۳-۳: $\alpha \equiv \frac{k}{y}\frac{\partial y}{\partial k}, \beta \equiv \frac{l}{y}\frac{\partial y}{\partial l}, \gamma \equiv \frac{e}{y}\frac{\partial y}{\partial e}, \delta \equiv \frac{t-t_0}{y}\frac{\partial y}{\partial t}$ ٤٤

۳-۳-۳: $l\frac{\partial a}{\partial l} = k\frac{\partial \beta}{\partial k}, e\frac{\partial \beta}{\partial e} = l\frac{\partial \gamma}{\partial k} = e\frac{\partial a}{\partial e}$ ٤٥

٤-۳-۳: $l\frac{\partial a}{\partial l} = k\frac{\partial \beta}{\partial k}$, $k\frac{\partial a}{\partial k} + l\frac{\partial a}{\partial l} + e\frac{\partial a}{\partial e} = 0$, $k\frac{\partial \beta}{\partial k} + l\frac{\partial \beta}{\partial l} + e\frac{\partial \beta}{\partial e} = 0$ ٤٥

۵-۳-۳: $\alpha = A(\frac{l}{k}, \frac{e}{k}), \quad \beta = B(\frac{l}{k}, \frac{e}{k}),$ ٤٥

٦-۳-۳: $\beta = \int^{k} \frac{l}{k'}\frac{\partial A}{\partial l}dk' + J(\frac{l}{e});$ ٤٥

۷-۳-۳: $a \geq 0, \beta \geq 0, \gamma = 1 - a - \beta \geq 0$ ٤٥

۸-۳-۳: $y = e(\frac{1}{k}, \frac{e}{k})$: .....**.....** ٤٦

۹-۳-۳ : $y_{CDE} = y_0 k^{a0} l^{\beta 0} e^{1-a0-\beta 0}$ ٤٦

۱۰-۳-۳: $a \to 0, if\ (l+e)/k \to 0, \beta \to 0, if\ \ k \to k_m(y), and\ e \to e_m \equiv ck_m(y)$ ٤٧

۱۱-۳-۳: $\alpha = a\frac{l+e}{k}, \beta = a(\frac{cl}{e} - \frac{l}{k}), \gamma = 1 - a - \beta = 1 - a\frac{e}{k} - ac\frac{l}{e}$ ٤٧

۱۲-۳-۳: $y_{L1} = y_0 e \exp\left[a(2 - \frac{l+e}{k}) + ac(\frac{l}{e} - 1)\right]$ ٤٨

(۱-۱-۳-۳): $\alpha = a\frac{L+E}{K}$ ٤٩

(٣-١-٣-٢): $\beta = a(b\frac{L}{E} - \frac{L}{K})$ ٥٠

(٣-١-٣-٣): $\gamma = 1-\alpha-\beta$ ٥٠

(٣-١-٣-٤): $Y = A\,E\exp\left[a(t)(2-(\frac{L+E}{k})) + a(t)b(t)(\frac{L}{E}-1)\right]$ ٥٠

(٣-١-٣-٥): $Y = E\times\frac{I_1}{E}\times\frac{I_2}{I_1}\times\frac{I_3}{I_2}\times\ldots\times\frac{Y}{I_n}$ ٥١

(٣-١-٣-٦): $Y = Efg = Ug$ ٥١

(٣-١-٣-٧): $U = Y_1(K^*, L^*.U^*)$ ٥٢

(٣-١-٣-٨): $Y = Y_2(K-K^*, L-L^*, U-U^*)$ ٥٢

(٣-١-٣-٩):
$$\alpha = (\frac{k}{y})(\frac{\partial y}{\partial k}) = \frac{d\ln y}{d\ln k}$$
$$\beta = (\frac{l}{y})(\frac{\partial y}{\partial u}) = \frac{d\ln y}{d\ln l}$$
$$\gamma = (\frac{u}{y})(\frac{\partial y}{\partial u}) = \frac{d\ln y}{d\ln u}$$
..... ٥٣

(٣-١-٣-١٠):
$$\alpha = a(\frac{l+u}{k})$$
$$\beta = a\left[b(\frac{l}{u}) - (\frac{l}{k})\right]$$
$$\gamma = 1-\alpha-\beta$$
..... ٥٣

(٣-١-٣-١١): $y = q_0 u\exp\left[a(2-(\frac{l+u}{k})) + ab(\frac{l}{u}-1)\right]$ ٥٣

(٣-١-٣-١٢): $y = q_0\exp\left\{2-a(\frac{u+1}{k-\partial}) + ab\frac{l}{u} + c\frac{\partial}{l}\right\}$ ٥٤

(٣-١-٣-١٣): $y = y(0) + \left\{a + \partial(-a\frac{u+l}{k^2}) + \frac{c}{l}\right\}$ ٥٤

٣-١-٤-١: $\boldsymbol{\partial F \partial k > 0\,,\, \partial 2F \partial K2 < \cdot\,,\, \partial F \partial L > \cdot\,,\, \partial 2F \partial L2 < \cdot}$ ٥٧

٣-١-٤-٢: $\boldsymbol{\lim K \to 0 \partial F \partial K = \lim L \to 0 \partial F \partial L = +\infty\,,\, \lim K \to +\infty \partial F \partial K = \lim L \to +\infty \partial F \partial L = 0.}$ ٥٨

٣-١-٤-٣: $\boldsymbol{R = \rho F K, L, R + \mu W,}$ ٦٠

٣-١-٤-٤: $\boldsymbol{F(K, L, R)R = 1\rho 1 - \mu W R}$ ٦٠

٣-١-٤-٥: $\boldsymbol{F(K, L, R)R \leq 1\rho}$ ٦٠

٦١ ..... $F(K,L,R)R \leq 1\ \rho R$: ٦-١-٤-٣
٦٢ ..... $dR = \rho\partial F(K,L,R)\partial R dR + \mu\partial W(K,L,R)\partial R dR$: ٧-١-٤-٣
٦٢ ..... $١ = \rho\partial FK,L,R\partial R + \mu\ \partial WK,L,R\partial R.$ ٨:-١-٤-٣
٦٢ ..... $\partial F(K,L,R)\partial R = 1\rho\ (\ 1 - \mu\partial WK,L,R\partial R)$: ٩-١-٤-٣
٦٢ ..... $\partial FK,L,R\partial R \leq ١\rho.$:١٠-١-٤-٣
٦٢ ..... $\lim R \to ٠\partial F(K,L,R)\partial R \leq ١\rho$:١١-١-٤-٣
٦٤ ..... $،Y_j = F^j(\ K_J, L_J, R_{١J}, \ldots\ldots, R_{nj})\ j = ١,\ldots., m,$: ١٢-١-٤-٣
٦٥ ..... $Rj = j = 1mRij$: ١٣-١-٤-٣
٦٥ ..... $Ij = i\ \rho ij > ٠\} \subseteq 1, \ldots\ldots., n$: ١٤ -١-٤-٣
٦٦ ..... $Y = F(K,L,Y1\ , \ldots\ldots, YM)$: ١٥ -١-٤-٣
٦٦ ..... $I = i\rho i > ٠ \subseteq 1, \ldots\ldots, n$: ١٦-١-٤-٣
٦٧ ..... $Fj(Kj\ , Lj\ , R1j\ ., \ldots.\ , Rnj\ )\ Rij\ \leq 1\rho ij\ ,\partial FjKj\ , Lj\ , R1j\ ., \ldots.\ , Rnj\ \partial Rij\ \leq 1\rho ij\ ,\ i \in Ij\ .$: ١٧-١-٤-٣
٦٧ ..... $Ri = j = 1mRij$:١٨-١-٤-٣
٦٧ ... $Rij = \rho ijFjKj\ , Lj, R1j\ , \ldots\ldots, Rnj + \mu ijWj،\ j = \ 1, \ldots\ldots, m\ ,$: ١٩ -١-٤-٣
٦٧ ..... :٢٠-١-٤-٣
٦٨ ..... $Ri = \rho iF\ K\ , L, Y1\ , \ldots\ldots, Ym + \mu i\ W + j = 1m\mu ijWj$:.٢١-١-٤-٣
٦٨ ..... $F\ K\ , L, Y1\ , \ldots\ldots, YmRi = 1\rho i1 - \mu i\ WRi - j = 1m\mu i\ WRi$: ٢٢ -١-٤-٣
٦٨ ..... $F\ K\ , L, Y1\ , \ldots\ldots, YmRi \leq 1\rho i\ .$: ٢٣ -١-٤-٣
$dRi = \rho i\ i = 1m\partial F\partial Yj\partial Fj\partial Rij\ dRij\ +\ j = 1m\mu ij\partial wj\partial\ Rij\ dRij\ .$:٢٤-١-٤-٣
٦٩ .....
٦٩ ..... $dRi = j = 1mdRij\ .$:٢٥-١-٤-٣
٦٩ $j = 1m[1 - \rho i\partial F\partial Yj\partial Fj\partial\ Rij - \ \mu i\ \partial W\partial YJ\partial Fj\partial Rij - \ \mu ij\partial Wj\partial Rij\ ]\ dRij = 0$: ٢٦-١-٤-٣
٧٠ ..... $\partial F\partial Yj\partial Fj\partial Rij = 1\rho i1 - \ \mu i\partial W\partial Yj\partial Fj\partial Rij - \mu ij\ \partial Wj\partial Rij$: ٢٧ -١-٤-٣
٧٠ ..... $\partial F\partial Yj\partial Fj\partial Rij \leq 1\rho i$: ٢٨-١-٤-٣
٧٠ ..... $dF = j = 1m\partial F\partial Yj\partial Fj\partial Rijd Rij\ .$ ٢٩-١-٤-٣
$dF = j = 1m\partial F\partial Yj\partial Fj\partial Rijd Rij\ \leq j = 1m1\rho idRij\ = 1\rho ij = 1mdRij =$:٣٠ -١-٤-٣
٧٠ ..... $1\rho idRij$
٧٠ ..... $dF \leq 1\rho idRi\ .$:٣١ -١-٤-٣

٣-٤-١-٣٢: $\boldsymbol{dFdRi \leq 1\rho i}$ ٧٠

٣-٥-١-١ : $(y^{iT}, r^{iT}, e^{iT})P = 0$ ٧٧

٣-٥-١-٢ : $(y^{iT}, r^{iT}, e^{iT})w = 0$ ٧٧

٣-٥-١-٣: $(y^{iT}, r^{iT}, e^{iT})S + \sigma^{i}(y^{i}, r^{i}, e^{i}) = 0$ ٧٧

٣-٥-١-٤ : $y := \sum_{i=1}^{n} y^{i}, r := \sum_{i=1}^{n} r^{i}, e := \sum_{i=1}^{n} e^{i}$ ٧٨

٣-٥-١-٥ : $(0, r^{T}, e^{T})P = 0$ ٧٨

٣-٥-١-٦ : $(0, r^{T}, e^{T})w = 0$ ٧٨

٣-٥-١-٧ : $(0, r^{T}, e^{T})s + S(y^{1}, ..., y^{n}, r^{1}, ...r^{n}, e^{1}, ..., e^{n}) = 0$ ٧٩

٣-٥-١-٨ : $(-I^{T}, r^{T}, e^{T})S + S(y^{1}, ..., y^{n}, r^{1}, ..., r^{n}, e^{1}, ..., e^{n}) = 0$ ٨٣

٣-٥-١-٩ : $(-I^{T}, r^{T}, e^{T})P = 0$ ٨٣

٣-٥-١-١٠ : $(-I^{T}, r^{T}, e^{T})w = 0$ ٨٣

٣-٥-٢-١ : $\dot{Z}_i = \phi_i(t) f_i(Z, r, e, l), \forall i \in \{1, ..., m\}$ ٨٥

٤-٣-١ : $Y = E \times \frac{I_1}{E} \times \frac{I_2}{I_1} \times \frac{I_3}{I_2} \times ... \times \frac{Y}{I_n} = E \times f_1 \times f_2 \times ....g$ ٩٣

٤-٤-١ : $\boldsymbol{e = PQ \times QPM \times M}$ ٩٧

٤-٤-٢ : $\boldsymbol{Q/M = \alpha < ١}$ ٩٧

٤-٤-٣ : $\rightarrow PQ > PM$ ٩٨

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۵-۱..... ۱۰۱

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱-۱: نمایش تقسیم بندی کلی ترمودینامیکی..... ۹
شکل ۲-۱-۲ماشین‌های گرمایی ۱۶
شکل ۳-۲-۱:چرخه های فرآیند های اقتصادی در جهان هستی ۴۲
شکل ۳-۴-۱: کران بالای تابع تولید ۶۱

فصل اول

کلیات پژوهش

فصل اول

۱-کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

دست‌یابی به رشد اقتصادی از اهداف مهم علم اقتصاد می‌باشد. در این راستا، اقتصاددانان بسیاری به بررسی ماهیت، علل و موانع رشد پرداخته‌اند و برای پاسخ به این موارد الگوهای مختلفی از رشد اقتصادی را پیشنهاد داده‌اند. در این راستا، دو سؤال مهم مطرح می‌شود. اولاً؛ چه عواملی در رشد اقتصادی بیشترین تأثیر را دارند؟ ثانیاً؛ آیا نرخ رشد اقتصادی می‌تواند همچون گذشته ادامه یابد؟

محور رشد اقتصادی، تولید هر چه بیشتر کالاها و خدمات می‌باشد که مستلزم مصرف بیشتر نیز می‌باشد. فرایند تولید، فرایندی است که به منابع انرژی و مواد معدنی نیازمند است. همواره مواد اولیه (خام) از طبیعت گرفته می‌شود و طی فرایندهایی مصرف می‌شود تا با افزایش تولید رشد اقتصادی حاصل شود. اما سؤال این است که این عمل تا کجا و تا چه زمانی می‌تواند به این شکل ادامه یابد؟ یا به عبارتی دیگر آیا رشد اقتصادی (با تاکید بر تولید و مصرف هر چه بیشتر) می‌تواند تا بی‌نهایت ادامه یابد؟

مدل‌های رشد اقتصادی جریان غالب انرژی را به عنوان یک عامل مهم در رشد اقتصادی به حساب نمی‌آورند. اما هدف از ساختن یک الگو، ارائه یک بینشی درباره برخی از ویژگی‌های جهان است. اگر ساده سازی فرض‌ها باعث شود که الگو پاسخ نادرستی برای پرسشی که قرار است پاسخ دهد، ارائه کند در این صورت فقدان واقع گرایی ممکن است یک نقص باشد[۱].برای فهم بهتر نقش

[۱]-رومر، اقتصاد کلان پیشرفته، ترجمه مهدی تقوی، صفحه ۲۶

انرژی در رشد اقتصادی ابتدا باید قوانین حاکم بر انرژی و ماهیت انرژی را در یابیم. بهترین علم برای مطالعه ماهیت انرژی، علم ترمودینامیک (زیر شاخه‌ای از فیزیک) می‌باشد.

در این رساله سعی می‌شود تا با استفاده از بینشی که قوانین ترمودینامیک از جهان هستی و انرژی فراهم می‌کند، نتایج تئوری‌های رشد متداول ارزیابی شود.

۱-۲- تعریف موضوع (تعریف مسئله، هدف از اجرا و کاربرد نتایج پژوهش)

تئوری‌های اقتصادی رشد متداول، از دهه ۱۹۵۰ توسعه یافتند. الگوی سولو[۲] نقطه آغاز تمامی تحلیل‌های رشد است.[۳]هنوز اغلب اقتصاددانان از روش‌های تئوری رشدی که برای یک مدل تک بخشی، که حدود نیم قرن پیش توسط سولو و سوان[۴]، توسعه یافت، استفاده می‌کنند. ویژگی کلیدی مدل سولو-سوان این بود که به طور صریح تابع تولید کلی را معرفی می‌کند که در آن خدمات سرمایه‌ای[۵] از انباره سرمایه[۶] بدست می‌آید. مدل سولو، در شکل ساده‌اش، فقط به دو متغیر بستگی دارد[۷] آن‌ها نهاده نیروی کار کل و انباشت سرمایه کل می‌باشند.

سولو یک تابع تولید کل با دو متغیر مستقل، سرمایه (***K***)، کار(***L***) و یک ضریب فزاینده برونزا[۸] ***A(t)*** که فقط به زمان وابسته می‌باشد و نمایش دهنده پیشرفت فنی[۹] یا بهره‌وری کل عوامل تولید[۱۰](TFP) می‌باشد را معرفی کرد. لزوم وجود یک چنین ضریبی از واقعیت ناشی می‌شود کهGDP سریع‌تر از K و ***L*** و یا هر ترکیبی از این دو، که شرط بازده ثابت نسبت به مقیاس را برآورده کند، رشد می‌کرد.

---

۲ -*Solow*

۳- رومر، اقتصاد کلان پیشرفته، ترجمه مهدی تقوی، صفحه ۱۶

۴-*Swan*
۵-*servicescapital*
۶-*capital stock*
۷-*Solow ۱۹۵۶،۱۹۵۷*
۸-*exogenous multiplier*
۹-*technological progress*
۱۰- *total factor productivity*

ساده‌ترین تابعی که شرط بازده ثابت نسبت به مقیاس را برآورده می‌کند، تابع کاب داگلاس[۱۱] است. شکل‌های ریاضیاتی شناخته شده دیگری نیز مانند توابع کشش ثابت جانشینی[۱۲] (CES) (ارو، چنری، ماین‌هاس، سولو)[۱۳]، تابع ترانس-لگاریتم[۱۴] (جورگنسون، لائو ۱۹۸۴)[۱۵] و خطی-نمایی[۱۶](کومل، استراسل، گوسنر، ایک‌هورن ۱۹۸۵)[۱۷] نیز وجود دارد. در حقیقت، این اشکال مختلف ریاضی نه به خاطر برتری یکی از آن‌ها بر دیگری، بلکه به خاطر سادگی انتخاب می‌شوند. صرف نظر از آنکه کدام شکل را انتخاب کنیم، قسمت بیشتر رشد باید به یک فرایند برونزا مانند (TFP) یا A(t) منسوب شود.

نتیجه گیری اصلی الگوی سولو این است که انباشت سرمایه فیزیکی نمی‌تواند، رشد فوق‌العاده در تولید سرانه را توضیح دهد. در این الگو سایر منابع بالقوه ایجاد تفاوت درآمد حقیقی (مانند پیشرفت فنی) یا برونزا در نظر گرفته می‌شود یا الگو آن‌ها را توضیح نمی‌دهد. بنابراین برای بررسی مسایل عمده رشد باید فراتر از الگوی سولو قدم برداریم.[۱۸]

با درون زا در نظر گرفتن پیشرفت فنی، نتیجه گرفته می‌شود که پیشرفت فنی درون زا تقریباً مهم‌ترین عامل در رشد در سراسر جهان بوده اما تفاوت درآمد بین کشورها را چندان توضیح نمی‌دهد.[۱۹] در این رساله سعی می‌شود تا با استفاده از بینشی که قوانین ترمودینامیک از جهان هستی و انرژی فراهم می‌کند، تطابق نتایج تئوری‌های رشد متداول را با واقعیت ارزیابی کنیم.

---

[۱۱] *-Cobb-Douglas function*
[۱۲] *-constant elasticity of substitution*
[۱۳] *- Arrow, Chenery, Minhas, Solow ۱۹۶۱*
[۱۴] *- trans-log function*
[۱۵] *- Jorgenson, Lau ۱۹۸٤*
[۱۶] *- linear-exponentialfunction*
[۱۷] *- Kuemmel, Strassl, Gossner, Eichhorn ۱۹۸٥*

[۱۸]- رومر، اقتصاد کلان پیشرفته ترجمه مهدی تقوی، ، صفحه ۱۷
[۱۹]- همان، صفحه ۱۸

۱-۳- سؤالات پژوهشی

با توجه به هدف ذکر شده، سؤالات زیر در این رساله مورد تمرکز قرار می‌گیرد:۱

۱) آیا با وارد کردن مفهوم آنتروپی در تئوری‌های رشد، پیش بینی‌های این تئوری‌ها به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود؟

۲) آیا با توجه به قوانین ترمودینامیک، می‌توان به رشد نامحدود فیزیکی اقتصاد امیدوار بود؟

۳) آیا مسئله پایداری در نظریات متعارف رشد اقتصادی می‌تواند تحت تأثیر قوانین ترمودینامیک باشد؟

۱-۴- روش پژوهش

در این پایان‌نامه، با توجه به ماهیت تئوریک موضوع، از منابع کتابخانه‌ای استفاده خواهد شد و پس از جمع‌آوری مطالب از متون مربوطه، چه در علم فیزیک و چه در حوزه اقتصاد رشد، با روش تحلیلی-توصیفی به استنتاج و تجزیه و تحلیل پرداخته می‌شود و از نظریه‌ی بازی برای یک سناریوی احتمالی نیز استفاده می‌شود.

۱-۵- مدت زمان پژوهش

پژوهش حاضر از مهر ماه سال ۱۳۹۰، آغاز و تا شهریور ماه سال ۱۳۹۲ به طول انجامیده است.

۱-۶- تعریف واژه‌ها و اصطلاحات تخصصی پژوهش

برای بیان و توضیح دادن قوانین ترمودینامیک ابتدا باید با برخی تعریف‌ها آغاز نمود. تبدیلات انرژی شامل کار، گرما و انرژی است.

رشد اقتصادی: رشد اقتصادی عبارت است از افزایش تولید یک کشور در یک سال خاص در مقایسه با مقدار آن در سال پایه.

انرژی: پتانسیل انجام کار یا تولید گرما را انرژی می‌نامند.

کار: هنگامی که جسمی حرکت می‌کند، به اندازه حاصل‌ضرب نیرو در جابه‌جایی کار گویند.

گرما: صورتی از انرژی است که از جسمی با دمای بالاتر به جسمی با دمای کمتر منتقل می‌شود.تأثیر گرما بر روی اجسام به صورت افزایش دما، انبساط و تغیر حالت (مثلاً جامد به مایع) یا افزایش فشار در گازها می‌باشد.

واحد اندازه گیری انرژی، کار و گرما در دستگاه SI ژول[۲۰] می‌باشد. بنا بر تعریف کار، یک ژول برابر کار لازم برای جابه‌جا نمودن یک جسم یک کیلوگرمی به اندازه‌ی یک متر، می‌باشد. یک ژول بر حسب گرما، برابر مقدار گرمای مورد نیاز برای افزایش دمای یک کیلوگرم آب، به اندازه‌ی $\frac{1}{4200}$ درجه سلسیوس می‌باشد.

انرژی، به عنوان پتانسیل انجام کار یا تولید گرما می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد.

انرژی پتانسیل: ناشی از ارتفاع موقعیت جسم است، مانند آبی که در یک دریاچه مرتفع قرار دارد و پتانسیل سرازیر شدن و در نهایت چرخاندن چرخ آسیاب (و انجام دادن کار) را دارد.

انرژی جنبشی: ناشی از حرکت جسم است، همچون آب جاری که چرخ‌های آسیاب را می‌چرخاند.

---

[۲۰] *Joule*

انرژی تابشی[۲۱]: انرژی‌ای است که از یک جسم داغ منتشر می‌شود، همچون انرژی خورشیدی که از خورشید ساطع می‌شود.

انرژی الکتریکی: انرژی‌ای است که به واسطه‌ی جریانی از ذرات باردار، در یک رسانا منتقل می‌شود.

انرژی شیمیایی: انرژی‌ای است که به واسطه‌ی واکنش‌های شیمیایی همچون سوختن ذغال سنگ تولید می‌شود.

اکسرژی: جزء دسترس پذیر انرژی را اکسرژی می‌نامند.

آنتروپی: جزئی از انرژی است که دسترس پذیر نمی‌باشد.

توان: عبارت از است از کار انجام شده در واحد زمان، که واحد آن ژول بر ثانیه یا وات می‌باشد.

سیستم: چنانچه ناحیه‌ی مشخصی از فضا به وسیله‌ی مرز معینی از محیطش جدا شده باشد، آن را سیستم می‌نامند.

فرایند برگشت پذیر و برگشت ناپذیر: فرایند برگشت پذیر فرآیندی است که به گونه‌ای انجام می‌شود که در پایان فرآیند، هم سیستم و هم محیط اطراف می‌توانند به حالت اولیه‌ی خود برگردند، بدون آنکه هیچ تغییری در بقیه جهان ایجاد نمایند. فرایندی که چنین شرایط دقیقی را برقرار نکند، برگشت ناپذیر خوانده می‌شود که در نهایت موجب افزایش آنتروپی می‌شود.

۱-۷- مراحل اجرای پژوهش

[۲۱]

در ابتدا سعی شد تاریخچه‌ای از ارتباط بین فیزیک و اقتصاد مطالعه شود و در نهایت با تمرکز بر مقالات برگزیده که به نقش انرژی و منابع طبیعی در رشد اقتصادی، با توجه به قوانین ترمودینامیک پرداخته‌اند، امکان پذیر بودن رشد اقتصادی نامحدود و پایداری رشد بررسی شد.

۱-۸- خلاصه فصل

در این فصل پس از مقدمه‌ی فصل به بیان موضوع پرداخته شد. در قسمت بیان موضوع، شرح مختصری از تاریخچه‌ی نظریه‌ی رشد اقتصادی متداول و انتقادات وارد بر آن داده شد و پس از بیان موضوع، مسئله‌ی پژوهش و اهداف پژوهش تشریح شد. تعریف واژه‌های تخصصی و مراحل انجام پژوهش قسمت‌های پایانی این فصل است.

فصل دوم

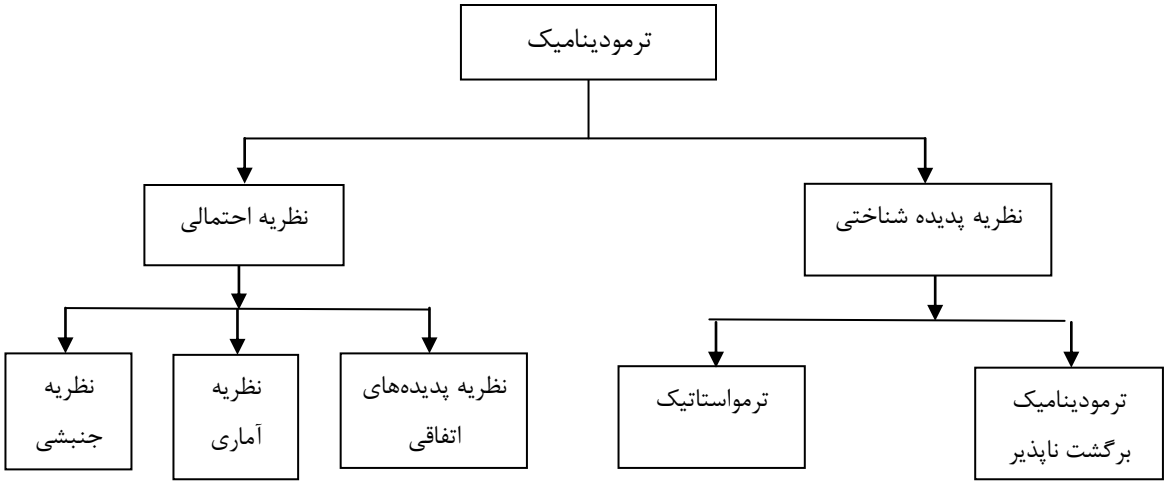
ادبیات پژوهش

۲- ادبیات پژوهش

۲-۱- پیشینه ترمودینامیکی

علم ترمودینامیک در قرن ۱۹ در طی مطالعه‌ی کارایی ماشین بخار، به وجود آمد، اکنون این علم به یکی از ارکان علم فیزیک تبدیل شده است. «ترمودینامیک علم رفتار شناسی سیستم‌ها می‌باشد که با معرفی ابزارهای ریاضی مناسب امکان شناخت رفتار پیچیده‌ی سیستم‌ها را فراهم می‌کند»[۲۲].

«به طور کلی، در مطالعه‌ی سیستم‌ها، اعم از گسسته و پیوسته، دو شیوه وجود دارد: (۱) شیوه‌هایی که بر اساس نظریه‌ی احتمال استوار است؛ (۲) روش‌هایی که بر اساس نظریه‌ی علیت (پدیده شناختی[۲۳]) می‌باشند. شیوه‌ی اول خود به نظریه‌ی پدیده‌های اتفاقی، نظریه‌ی آماری و نظریه‌ی جنبشی تقسیم می‌شود. شیوه‌ی دوم شامل دو شاخه‌ی ترمواستاتیک و ترمودینامیک برگشت ناپذیر است. در شکل ۲-۱-۱ تقسیم بندی مذکور نشان داده شده است»[۲۴].



شکل ۲-۱-۱: نمایش تقسیم بندی کلی ترمودینامیکی

[۲۲] - مقاری،علی، مباحث پیشرفته ترمودینامیک و مکانیک آماری تعادلی و غیر تعادلی، دانشگاه تهران (۱۳۹۰)، صفحه‌ی ۱

[۲۳] *phenomenological-*

[۲۴] همان، صفحه‌ی ۲

به طور کلی می‌توان فیزیک را علمی دانست که به مطالعه طبیعت و انرژی می‌پردازد. قوانین ترمودینامیک پایه و اساس درک عملکرد سیستم‌های محیطی می‌باشند؛ لذا به نظر می‌رسد که این قوانین می‌توانند پایه و اساس درک و فهم سیستم‌های اقتصادی نیز باشند. با استفاده از این علم می‌توان به درک و بینش صحیحی از رفتار طبیعت و انرژی دست یافت که اقتصاد همواره با آن درگیر است و یا بهتر است بگوییم که رشد اقتصادی بدون بهره گیری از طبیعت میسر نمی‌باشد. در این بخش سعی می‌شود تا قانون اول و دوم ترمودینامیک، با پرهیز از ریاضیات پیچیده، بیان شود، تا با استفاده از این قوانین طبیعی به یک فهم و بینش صحیحی از ماهیت وجودی انرژی و ماده حاصل شود. در ابتدا برخی از مفاهیم ترمودینامیک پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱- قانون اول ترمودینامیک

طبق قانون اول ترمودینامیکی مجموع کل انرژی و جرم ثابت می‌باشد. طبق این قانون تمام جرم‌هایی که وارد هر فرایند تبدیلی– از جمله فرایندهای اقتصادی– می‌شوند باید به عنوان یک کالای مفید یا تغییر موجودی یا ضایعات مصرف شوند. در حقیقت اغلب مواد استخراج شده از زمین به ضایعات تبدیل می‌شوند. به همراه تمام فعالیت‌های اقتصادی، ضایعات[۲۵] انرژی و مواد وجود دارد.

برای بیان قانون دو ترمودینامیک که درباره‌ی کیفیت انرژی صحبت می‌کند لازم است که انواع سیستم‌ها در ترمودینامیک معرفی شود.

[۲۵]- *waste*

۲-۱-۲- طبقه بندی سیستم‌های ترمودینامیکی

بر اساس تفاوت بین جریان‌های انرژی و ماده در طول مرزهای سیستم‌ها، سه نوع سیستم ترمودینامیکی معرفی می‌شود:

(۱)سیستم باز[۲۶]، سیستمی است که با محیط خود ماده و انرژی مبادله می‌کند؛

(۲)سیستم بسته[۲۷] ، سیستمی است که محیط خود فقط انرژی مبادله می‌کند؛

(۳) سیستم منزوی[۲۸]، سیستمی است که با محیط خود هیچ نوع ماده یا انرژی‌ای مبادله نمی‌کند.

از نظر ترمودینامیکی، اقتصاد یک سیستم باز است. با منابع طبیعی و محیط پیرامون خود هم ماده و هم انرژی مبادله می‌کند. محیط زیست از نظر ترمودینامیکی یک سیستم بسته است. محیط زیست از محیط اطراف خود (مابقی جهان) تنها انرژی مبادله می‌کند. انرژی به صورت‌های مختلفی از محیط زیست وارد اقتصاد می‌شود برای مثال،انرژی تابشی (نور خورشید)، انرژی جنبشی (آب جاری، باد، امواج)، انرژی پتانسیل (مخازن آب) و انرژی شیمیایی (سوخت‌های فسیلی، بافت‌های گیاهی و حیوانی[۲۹]). انرژی عمدتاً به صورت گرمای تلف شده[۳۰] و انرژی شیمیایی موجود در پس‌ماندها[۳۱]، از اقتصاد به محیط زیست منتقل می‌شود. جریان‌های مادی[۳۲] در طول مرزهای اقتصاد-محیط زیست به شکل‌های مختلفی در هر دو جهت صورت می‌گیرد. توجه شود که پایستگی جرم به این معنی است که جریان‌های جرم در طول مرز سیستم، در هر جهت برابر

---

[۲۶] *open system*
[۲۷] *closed system*
[۲۸] *isolated system*
[۲۹] *plant and animal tissue*
[۳۰] *waste heat*
[۳۱] *chemical energy in residues*
[۳۲] *Material flows*

باشند؛ بر حسب جرم، مواد استخراج شده از طبیعت توسط اقتصاد برابر با موادی است که اقتصاد به طبیعت اضافه می‌کند. البته ساختار جریان بهره‌برداری شده توسط اقتصاد متفاوت از ساختار جریان اضافه شده به طبیعت است.

این مطلب که محیط زیست، یعنی سیاره زمین در مفهوم ترمودینامیکی یک سیستم بسته است، به طور دقیق صحیح نمی‌باشد. زیرا زمین مقدار زیادی انرژی و مقدار بسیار اندکی ماده با محیط پیرامونش (فضا) مبادله می‌کند. اما از آنجایی که مقدار ماده مبادله شده بین زمین و محیط پیرامونش، بسیار، بسیار اندک است،لذا به طور کلی زمین همچون یک سیستم بسته رفتار می‌کند.

ماده‌ی مبادله شده عمدتاً شامل شهاب سنگ‌ها می‌باشد، شهاب سنگ‌ها به طور منظم هر هزار سال وارد محیط زیست (زمین) می‌شوند. شهاب سنگ‌ها دارای اندازه‌های بسیار متفاوتی می‌باشند، اما اغلب آن‌ها کوچکند و در اتمسفر می‌سوزند. سنگین‌ترین شهاب سنگی که تا کنون دیده شده است ۶۰ تن است. به طور استثنایی شهاب سنگ‌های بزرگ توانستند تأثیرات مهمی بر تاریخ سیاره‌ی زمین گذارند. یک توضیح پذیرفته شده برای انقراض دایناسورها و پیدایش پستانداران، تغیرات آب و هوایی ناشی از یک شهاب سنگ به عرض ۶ مایل، در ۶۵ میلیون سال پیش می‌باشد. در اغلب تاریخچه‌ی سیاره‌ی زمین هیچ ماده‌ای از آن خارج نشده است. در ۵۰ سال گذشته انسان‌ها ظرفیت فرستادن ماده (به صورت انواع وسایل نقلیه‌ی فضایی) به بیرون از مرزهای محیط/گیتی را گسترش داده‌اند، اما این مقدار بسیار کوچک است.

جریان انرژی عبور کننده از مرز بین محیط زیست ما و محیطش بسیار بزرگ است و به اندازه‌ی تمام تاریخچه‌ی سیاره‌ی زمین است. «جریان ورودی انرژی، تابش خورشیدی است که