# هرج و مرج انرژی: آیا نوسانات بازار نفت علل غیر اقتصادی دارنـــــد؟

جواد صابر: دانشجوی فوق لیسانس مهندسی کنتـرل دانشـگاه تهـــران
کارولوکس: دانشیار گروه مهندسی برق و الکتـرونیـک ـ دانشگاه تهـران

چکیـده:

دراین مقاله پدیده های دو شاخه شدن و هرج و مرج درسیستمهای دینامیکی غیر خطی بررسی می‌شود و چگونگی‌پدیدار شدن آنها در مورد الگوی پرل ورید که برای نمایش ریاضی رفتار دینامیکی منابع نقشی به کار رفته است نشان داده می‌شوند. از این بررسی چنین برمی‌آید که نوسانات مشاهده شده در بازار نفتی را می‌توان با دینامیزم درونی آن توضیح داد و افزایش نـرخ رشد مصرف انرژی باعث تشدید این نوسانات و بروز هرج و مرج کامل در بازار انرژی خواهد شد.

## ۱ـ مقـدمـه

مصرف انرژی در جوامع مختلف بستگی مستقیم و پیوسته ای با برنامه های توسعه و رشد اقتصادی آنهادارد فراهم بودن انرژی لازم موجب افزایش تحرک و فراهم شدن زمینه های فعالیت‌برای هسته هاو واحدهای صنعتی وتولیدی می‌شود. بنابراین درکشورهایی که صنعت از رشد و توسعهٔ کافی برخورداراست ،تقاضا و مصرف انرژی هم به همان‌نسبت در مقایسه با کشورهای غیرصنعتی بسیار بالاتر است.

در حال حاضر نفت خام و گاز طبیعی ۹۵٪ نیازهای کشور ما را به انرژی تأمین می‌کنند و سایر منابع درمجموع معادل ۵٪ در تأمین این نیاز شرکت دارند.

تولیدات نفت ایران مانند بیشتر کشورهای تولیـد کننده از سال ۱۹۶۰ سریعا" رو به رشد گذاشت. در سالهای دههٔ ۶۰ اولا "به علت رونق اقتصادی در کشورهای پیشرفتهٔ صنعتی تقاضای انرژی با سرعتی بیشتر افزایش یافت و ثانیا " شرکتهای نفتی در سالهای ۱۹۵۹ و ۱۹۶۰ متوالیا " قیمـت هر بشکه نفت را کاهش دادند و این امراز یک طرف باعث افزایش سریعترتقاضا شدو از طرف دیگر کشورهای‌تولیدکننده را وادار ساخت تا برای از دست ندادن عواید ،مقدار تولید خود را افزایش دهند.

با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شودکه از نیمهٔ دوم دههٔ ۶۰ نرخ رشد تولید باز هم بیشتر می‌شود وبخصوص درسالهای بین ۱۹۷۰ الی ۱۹۷۳ ،در حالی که ایالات‌متحده امریکا که تا این تاریخ یکی از تولید کنندگان عمدهٔ نفتی بودبه علت استهلاک سریع منابع نفتی خود ، رشد تولید را متوقف کرد ، تمام فشار تقاضای انرژی نفتی ، بیشتر بردوش کشورهای تولیدکننده اوپک بخصوص خاور میانه قرار گرفت و ایران نیزبه نوبهٔ خود به روندافزایش تولید نفت ادامه‌داد.

ازسال ۱۹۷۴به علت افزایش‌قیمت نفت خام و عوامل‌دیگری ازقبیل جانشینی منابع انرژی و صرفه جوئی در مصرف‌انرژی کشورهای صنعتی و بخصوص کاهش در رشد اقتصادی سرعت رشد تقاضابرای نفت خام کم می‌شود و تولید نفت ایران هم درحدود ۲میلیارد بشکه در سال تثبیت می‌گردد. درسالهای بعد از ۱۹۸۰ ادامه سیاست صرفه جوئی و جانشینی منابـع انرژی همراه با بحران شدید اقتصادی در کشورهای غربـی باعث می‌شود تا تقاضای انرژی روندی کاهش داشته باشدو این روندابتدا در سطح تولیدکشورهای اوپک و سپس درسطح قیمت بین المللی نفت تاثیر گذاشت. (۱) علت برخی از نوسانات که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود به بحرانهای شدید انرژی در دو دههٔ اخیر و مشکلات حادی که در پی افزایش سریع قیمت نفت در دههٔ ۱۹۷۰ به وجود آمدند، مربوط می‌شود. قیمت نفت طی دو بحران در سالهای ۷۴ ـ ۱۹۷۳و ۸۰ـ ۱۹۷۹ دچار دگرگونی شد و تنها در مرحلهٔ اول، با افزایش حدودچهار برابرقیمت نفت درآمد صادراتی‌کشورهای اوپک طی‌این سالها از ۴۲ میلیارد دلار به ۱۱۶ میلیارددلار رسید. درآمد و سرمایه‌ای که بر اثر این افزایش در اختیار کشورهای اوپک قرارگرفته بود از طرفی رشد سریع اقتصادی را برای این کشورها امـری‌ممکن و محتمل می‌ساخت و ازسوی دیگر در زمینهٔ‌تعادل انرژی موازنهٔ عرضه و تقاضا در بازار جهانی به شدت تحت تأثیر قرارگرفت و کشورهای صنعتی بزرگ درصدد تهیهٔ برنامه‌ای برای کاهش وابستگی به نفت برآمدند و به دنبال آن " سازمان همکاری و توسعهٔ‌اقتصادی" بـه ایجادمدل سیستم‌انرژی اقدام کرد. عده‌ای‌ازکارشناسان براثر افزایش مستقیم قیمت نفت در کاهش تقاضای آن تأکید می‌کنند، اما کاهش قیمت نفت را در افزایش تقاضای آن به همان اندازه مؤثر نمی‌دانند. این ویژگی موسوم به "اثر

1- Organization for Economic Co-operation and Develepment "DECD"

تاءخیری" گویای آن است‌که تغییرات ساختاری بازدارندهٔ رشد مصرف در دورهٔ افزایش قیمت، در موقع کاهش قیمت نمی‌تواند به سادگی و با عمل درجهت خلاف، مصرف انرژی را بالا ببرد. [۲]

ادامهٔ روند کاهش تقاضای نفت در کشورهای مصرف کننده باعث شد که قیمت نفت خام اوپک در بازاراز حدود ۲۸ دلار در هر بشکه در پایان سال ۱۹۸۵ به حدودبشکه‌ای ۸ دلار در نیمهٔ سال ۱۹۸۶ سقوط کرده، سپس اندکی بالا رفته و به سطح فعلی ۱۸ دلار در هر بشکه رسیده است. رویدادهای مصیبت بارسال ۱۹۸۶ یکباره و تصادفی حادث نشد بلکه تمام‌آنها نتیجهٔ روند طولانی دگرگونی در ساختار انرژی جهان به‌حساب می‌آیدکه سرانجام موجب بروز فشارهای طاقت فرسای بازار بر کشورهای عضو اوپک شد. تمام این حوادث از بحرانی ناشی می‌شود که هر کدام از کشورهای‌اوپک به نوبهٔ خود بایستی ازوقوع مجدد آن جلوگیری کنند. [۳]

از دید جهانی و بلند مدت نیز تجربهٔ نوسانات دهه های ۱۹۶۰ و۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ نشان داده است که‌تغییرات ناگهانی و نوسانات پیش بینی نشده در بازار جهانی نفت به نفع هیچکس نیست واز یک طرف مصرف روزافزون می‌تواند باعث از بین رفتن سریع منابع محدود انرژی شود در حالی که وابستگی اقتصاد جهانی به انرژی درهمان زمان افزایش می‌یابدواز طرف‌دیگربحرانهای اقتصادی که بر اثر عدم‌توجه به این امرواقع می‌شوندباعث اتلاف منابع انسانی‌وسرمایه‌ای می‌شوندو اثرات نامطلوب آن، هم در کشورهای تولیدکننده و هم در کشورهای مصرف کننده ظاهر می‌شوند.

در این مقاله مبانی علمی و ریاضی عواملی که در دینامیزم رشد تولید و مصرف انرژی می‌توانند باعث عدم ثبات در مکانیزمهای تبادل و استفاده از منابع انرژی و به ویژه منابع نفتی شوند، به منظور پیشگیری از بروز هرج و مرج و پیدایش بحران، بررسی می‌شود.

## ۲- پدیدهٔ "هرج‌و مرج"[1] ازدر دیدگان نظریهٔ سیستمها

"هرج و مرج" به یک معنی کشف جدیدی است و هنوز هیچ تعریف رضایت بخش ریاضی برای آن داده نشده است. طیف وسیعی از پدیده های طبیعی نشان دهندهٔ وجود رفتار پیچیده، غیر قابل پیش بینی و شبه تصادفی هستند که توصیف و تشریح تئوری این پدیده های پیچیده همچنان به صورت یک مسالهٔ باز باقی مانده است. دشواری کار در خصوصیات غیر خطی معادلات ریاضی نمایش دهندهٔ این سیستمهای واقعی نهفته است. اما به هر حال در دههٔاخیر پیشرفتهای قابل ملاحظه‌ای حاصل شده است. این پیشرفتها مرهون ترکیب تقریبهای تحلیلی و مشابه سازیهای عددی با کامپیوترهای دیجیتال بسیار سریع بوده است.

ترکیب نتایج آزمایشهای عددی با تحلیل ریاضی، یک‌میدان بینابینی جدیدی درعلوم‌به نام "دینامیک غیر خطی"[2] ایجاد کرده است. کارهایی که دراین زمینه انجام شده طیفی‌وسیع از مسائل علوم مختلف نظیر جریان مغشوش در فیزیک، تحولات در راکتورهای شیمیایی، مدارهای الکتریکی و الکترونیکی، و مسائل نوری، پدیده‌های‌اکوستیک، سیستمهای کنترل با پس خورد، رشد جمعیتهای زیستی، نوسانات قیمت در بازارهای اقتصادی و ..... را می‌پوشاند.

رفتار "هرج و مرج گونه"[3] ابتدائا" در اثر طبیعت غیر خطی سیستم به‌وجود می‌آید نه نوسانات آماری خارجی، و دقیقا" می‌تواند با معادلات نفتی توصیف شود. ما کلمهٔ هرج و مرج را آن گونه که "لی"[4] و "یورک"[5] پیشنهاد کرده‌اند برای توصیف وضعیتی به کار می‌بریم‌که اولا "سیستم، رفتار دوره‌ای" داشته باشد ثانیا" مسیر همهٔ دوره های متناوب به طور همزمان پدیدار شود که هیچ عبارتی برای پایداری این دوره های همزمان وجود ندارد. [۴]

درحقیقت‌هرج و مرج پدیدهٔ اضافه شدن دورهٔ نوسانات است.

به مناسبت‌موضوع این مقاله و مباحث‌بعدی ما‌بررسی خود را روی مدلهای رشد، متمرکز می‌کنیم. ضمنا" با توجه‌به اهمیت‌روزافزون مدلهای‌بازمان منفصل‌و امکان کاربردکامپیوتر دیجیتال‌برای حل و بررسی این مدلها و نیز از نظر سادگی بیان واثبات قضایای ریاضی، در اینجا فقط سیستمهای‌منفصل را در نظر می‌گیریم.

چنانچه $X_n$ نمایش دهندهٔ حالت سیستم در زمان $n$ باشد مدل دینامیکی سیستم را می‌توان به کمک معادلهٔ

---

2- Chaos 3- Chaotic 4- T.Y.Li 5- J.Ayork

$$X_{n+1}=F(x_n)$$

تفاوتی[1] زیر نشان داد :

$$X_{n+1}=F(X_n)$$

مسیر حالت ، و یا در مورد سیستمهای مرتبهٔ دوم ($X_n$برداری) مسیر فاز ، سیستم نمایش داده شده با معادلهٔ (۱) یک دنباله از نقاط $[X_n]$ است که برای هر زمان $n$ رابطهٔ تفاوتی مورد نظر ، بینشان برقرار باشد .

پایداری پاسخ این معادله مشابه باپایداری پاسخ سیستمهای پیوسته ( که با معادلات دیفرانسیل نمایش داده می‌شوند ) به مفهوم لیاپانوف مطرح می‌شود . به بیان رسمی مسیر حالت $X_n^t$ را برای معادلهٔ (۱) هنگامی پایدار می‌نامیم که برای هر مقداردلخواه و کوچک ، $\varepsilon > 0$ بتوانیم $\delta(\varepsilon) > 0$ را به گونه‌ای پیدا کنیم که برای تمام نقاط مسیر به ازای $(X_o - X_o^*) < \delta$ داشته باشیم .

$$|X_n - X_n^*| < \varepsilon \quad \text{و} \quad n = ۱ \text{ و } ۲ \text{ و } ۳$$

به نحومشابه می‌توان تعاریف پایداری مجانبی ، پایداری موضعی ، پایداری همه جانبه و پایداری مطلق را هم برای معادلهٔ (۱) بسط و تعمیم داد . [۵]

اگر پاسخی برای معادلهٔ (۱) به شکل زیر وجود داشته‌باشد .

$$X_n = \text{ثابت} = X^* \quad (۲)$$

آن را نقطهٔ تعادل ۲ می‌نامیم و این پاسخ بایستی در تساوی زیر صدق کند

$$X^* = F(X^*) \quad (۳)$$

اگر پاسخ (۲) پایدار باشدآن را نقطهٔ تعادل پایدار خواهیم نامید .

وجود نقطهٔ تعادل را به روش ترسیمی مثلا " با استفاده از دیاگرام لامری و یا تکرار ساده می‌توان پیداکرد .

در حالت کلی وجود نقطهٔ تعادل در صورتی ممکن است‌که رابطهٔ (۳) حداقل دارای یک ریشهٔ مثبت $X^*$باشد .

با خطی کردن معادلهٔ (۱) می‌توانیم به سادگی رفتارمسیر حالت را در همسایگی نقطهٔ تعادل مطالعه‌کنیم : نقطهٔ تعادل $X^*$ پایدار مجانبی است‌اگر :

$$\left|\left(\frac{dF}{dX}\right)_{X^*}\right| < 1 \quad (۴)$$

و $X^*$پایدار است اگر :

$$\left|\left(\frac{dF}{dX}\right)_{X_1^*}\right| > 1$$

پاسخ $\{X_n^*\}$ برای معادلهٔ (۱) اگر از مجموعهٔ محدودی با دورهٔ $T$ تشکیل شود به طوری که :

$$X_n^* = X_{n+T}^* \quad n = ۰ \text{ و } ۱ \text{ و } ۲ \text{ و } \cdots T-۱ \quad , \quad X_{n+j}^* \neq X_n^* \quad j = ۱ \text{ و } ۲ \text{ و } \cdots$$

درآن صورت پاسخ متناوب با دورهٔ تناوب $T$ نامیده‌می‌شود .

برای دیدن اینکه بین پاسخهای (۱) ، سیکلهای متناوب ( مثلا " با دورهٔ تناوب ۲ ) وجود دارند یا نه و نیز برای محاسبهٔ آنها بایستی جوابهایی را به شکل

$$X_n = X_{n+2} = X_{n+4} = \cdots\cdots$$

جستجو کنیم .

روشن است که

$$X_{n+2} = F(X_{n+1}) = F\left[F(X_n)\right] = F^{(2)}(X_n)$$

سیکل با دورهٔ ۲ تنها در صورتی ممکن است به‌وجود آیدکه دو ریشهٔ مثبت و متمایز $X_1^2$ و $X_2^2$ وجود داشته باشند که شرایط زیر را ارضا کنند .

$$X_2 = F(X_1), \quad X_1 = F(X_2)$$

واضح‌است که ما $X_1$ و $X_2$ را می‌توانیم‌ازبین جوابهای‌معادلهٔ زیر پیدا کنیم :

$$X_n = F^{(2)}(X)$$

با خطی کردن معادلهٔ $X_{n+2}=F^2(X_n)$ در یکی از نقاط ، مثلا "در $X_2^2$ وآزمودن شرط (۴) می‌توانیم ببینیم که‌آیا $X_2^2$ یک نقطه پایدار هست یا خیر

$$\left(\frac{dF^{(2)}}{dX}\right)_{X_2^2} = \left(\frac{dF}{dX}\right)_{F(X_2^2)} \left(\frac{dF}{dX}\right)_{X_2^2}$$

$$= \left(\frac{dF}{dX}\right)_{X_1^2} \left(\frac{dF}{dX}\right)_{X_2^2} = \left(\frac{dF^{(2)}}{dX}\right)_{X_1^2}$$

---

1- Periodic 2- Period 3- Difference Equation 4- Equilibrium

5- Lamerey Diagram

جدول (۱)، آمار زمانی تولید و ذخائر نفتی ایران بین ـ سالهای ۱۹۶۰ و ۱۹۸۰

| سال | $Q_p(t)$ تولیدات روزانه ( هزار بشکه ) | $Q_p(t)$ تولیدات سالانه (میلیون بشکه) | $Q_p(t)$ انباشته تولید (میلیون بشکه ) | $Q_r(t)$ باقیمانده ذخائر مطمئن ( میلیون بشکه ) | $Q_d(t)$ انباشته اکتشافات میلیون بشکه |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱۹۶۰ | ۱۰۶۷/۷ | ۳۹۰/۸ | ۴۱۶۷/۷ | ۳۵۰۰۰ | ۳۹۱۶۷/۷ |
| ۶۱ | ۱۲۰۲/۲ | ۳۹۰/۸ | ۴۶۰۶/۵ | ۳۵۰۰۰ | ۳۹۶۰۶/۵ |
| ۶۲ | ۱۳۳۴/۵ | ۴۳۸/۸ | ۵۰۹۳/۶ | ۳۷۰۰۰ | ۴۲۰۹۳/۶ |
| ۶۳ | ۱۴۹۱/۳ | ۴۸۷/۱ | ۵۶۳۷/۹ | ۳۷۰۰۰ | ۴۲۶۳۷/۹ |
| ۶۴ | ۱۷۱۰/۷ | ۵۴۴/۳ | ۶۲۶۴/۰ | ۳۸۰۰۰ | ۴۴۲۶۴/۰ |
| ۶۵ | ۱۹۰۸/۳ | ۶۲۶/۱ | ۶۹۶۰/۵ | ۴۰۰۰۰ | ۴۶۹۶۰/۵ |
| ۶۶ | ۲۱۳۱/۸ | ۶۹۶/۵ | ۷۷۳۸/۶ | ۴۴۲۰۰ | ۵۱۹۳۸/۶ |
| ۶۷ | ۲۶۰۳/۲ | ۷۷۸/۱ | ۸۶۸۸/۸ | ۴۳۸۰۰ | ۵۲۴۸۸/۸ |
| ۶۸ | ۲۸۳۹/۸ | ۹۵۰/۲ | ۹۷۲۸/۲ | ۵۴۰۰۰ | ۶۳۷۲۸/۲ |
| ۶۹ | ۳۳۷۵/۸ | ۱۰۳۹/۴ | ۱۰۹۶۰/۳ | ۵۵۰۰۰ | ۶۵۹۶۰/۳ |
| ۷۰ | ۳۸۲۹/۰ | ۱۲۳۲/۲ | ۱۲۳۵۷/۹ | ۷۰۰۰۰ | ۸۲۳۵۷/۹ |
| ۷۱ | ۴۵۳۹/۵ | ۱۳۹۷/۶ | ۱۴۰۱۴/۸ | ۵۵۵۰۰ | ۶۹۵۱۴/۸ |
| ۷۲ | ۵۰۲۳/۱ | ۱۶۵۶/۹ | ۱۵۸۵۴/۳ | ۶۵۰۰۰ | ۸۰۸۵۳/۳ |
| ۷۳ | ۵۸۶۰/۹ | ۱۸۳۸/۵ | ۱۷۹۹۲/۵ | ۶۰۰۰۰ | ۷۷۹۹۲/۵ |
| ۷۴ | ۶۰۲۱/۶ | ۲۱۳۹/۲ | ۲۰۱۹۰/۴ | ۶۶۵۰۰ | ۸۶۱۹۰/۴ |
| ۷۵ | ۵۳۵۰/۱ | ۲۱۹۷/۹ | ۲۲۱۴۳/۲ | ۶۴۵۰۰ | ۸۶۶۴۳/۲ |
| ۷۶ | ۵۸۸۲/۹ | ۱۹۵۲/۸ | ۲۴۲۹۶/۳ | ۶۳۰۰۰ | ۸۷۲۹۶/۳ |
| ۷۷ | ۵۶۶۲/۸ | ۲۱۵۳/۱ | ۲۶۳۶۳/۳ | ۶۲۰۰۰ | ۸۸۳۶۳/۳ |
| ۷۸ | ۵۲۴۱/۷ | ۲۰۶۶/۹ | ۲۸۲۷۶/۵ | ۵۹۰۰۰ | ۸۷۲۷۶/۵ |
| ۷۹ | ۳۱۲۱/۲ | ۱۹۱۳/۲ | ۲۹۴۱۵/۷ | ۵۸۰۰۰ | ۸۷۴۱۵/۷ |
| ۸۰ | ۱۴۷۰/۸ | ۱۱۳۹/۲ | ۲۹۹۵۲/۶ | ۵۷۵۰۰ | ۸۷۴۵۲/۶ |
| | | ۵۳۶/۸ | | | |

$q_p(t) = Nq'_p(t)/1000$

$Q_p(t)=Q_p(t-1)+q_p(t)$

$Q_d(t)=Q_p(t)+Q_r(t)$

از رابطهٔ بالا چنین برمی‌آید که هرگاه پاسخ یک سیستم متناوب با دورهٔ ۲ باشد نقاط تعادل یا هر دوپایدارند و یا هر دو ناپایدار.

در حالت کلی که بخواهیم پایداری پاسخ با سیکل متناوب با دورهٔ T را مطالعه کنیم باز به نحو مشابه عمل می‌نمائیم.

$$(\frac{dF^{(T)}}{dX})_{X_1^T} = (\frac{dF}{dX})_{F^{(T-1)}(X_1^T)} (\frac{dF^{(T-1)}}{dX})_{X_1^T} = \ldots$$

$$\ldots = (\frac{dF}{dX})_{X_T^T} (\frac{dF}{dX})_{X_{T-1}^T} \ldots (\frac{dF}{dX})_{X_1^T} = \ldots$$

و برای بقیهٔ نقاط هم همین جواب به دست می‌آید ودرنتیجه $\frac{dF^{(T)}}{dX}$ در تمام نقاط تعادل برابر خواهد بود.

$$\lambda^{(T)} = \prod_{j=1}^{T} (\frac{dF}{dX})_{X_j^T} \qquad (۶)$$

ملاحظه می‌شود که در حالت کلی هم وضعیت پایداری تمام نقاط تعادل همانند است:

اگر $\lambda^{(T)} < 1$ باشد نقاط تعادل پایدارند و سیکل جذب‌کنندهٔ[1] خوانده می‌شود.

و اگر $\lambda^{(T)} > 1$ باشد نقاط تعادل ناپایدارند و سیکل "دفع کننده" ۲ نامیده می‌شود.

جدا از نقاط تعادل و پاسخهای سیکلی که از آنها صحبت کردیم، معادلات تفاوتی رفتار دیگری هم می‌توانند از خود نشان دهند که موضوع این قسمت از بحث است. این رفتار، رفتار هرج و مرج گونه می‌باشد که در این حالت مسیرهای فاز درهم و برهم‌اند و بی نظمی برآنها حاکم است.

دراین وضعیت هیچ دنبالهٔ پریوریک $X_n$ به سمت نقطهٔ تعادل یا یک سیکل بخصوص نزدیک نمی‌شود. چنین استنباط می‌شودکه بین ظهورپاسخ متناوب سه نقطه‌ای (سیکل با دورهٔ تناوب ۳) ووجود جواب هرج و مرج گونه ارتباطی وجود دارد.

در حقیقت "لی" و "یورک" ثابت کرده‌اند که اگر پاسخ معادلهٔ (۱) پاسخی متناوب با دورهٔ سه باشد یعنی

$$X_{n+3} = X_n \neq X_{n+1} \neq X_{n+2}$$

آنگاه لزوما" نتیجه می‌شود که با پارامترهای مشابه، پاسخهای متناوب دیگر با دوره تناوبهای صحیح وجود دارند وانگهی نقاط غیرقابل شمارشی به عنوان جواب اولیه $X_0$ وجوددارند که به ازای آنها سیستم حتی به طور مجانبی هم پریوریک نیست بلکه از خود رفتار هرج و مرج گونه نشان می‌دهد. بنابراین رفتار و چگونگی پاسخ دراین سیستمها شدیدا" وابسته به مقدار اولیهٔ $X_0$ است.

۳)- مدل منابع

بررسی رشدکمی بسیاراز متغیرهای فیزیکی واجتماعی نشان داده است که در شرایط معمولی نرخ رشد کمیت مورد نظر در هر زمان با مقدار کمیت متناسب است.

این فرض در مورد برخی پدیده های فیزیکی مانند فساد رادیواکتیو با تقریب خوب، در مورد برخی پدیده‌های اجتماعی مانند رشد جمعیت با تقریب قابل قبول برای مدت محدود (میان مدت) و در موردبرخی پدیده‌های تکنولوژیکی مانندا کتشاف و استخراج منابع نفتی با احتیاط و برای مدت محدود قابل کاربرد است.

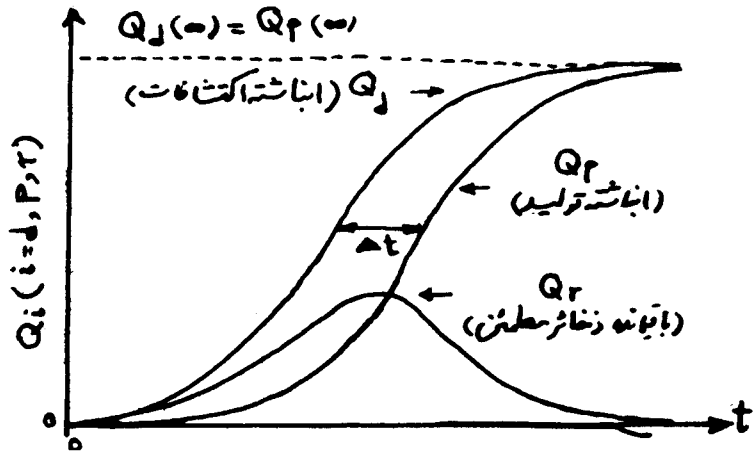
اما غالبا" براثر گذشت زمان، نرخ رشد، با وجود افزایش کمیت روبه کاهش می‌گذارد و بالاخره به صفر میل می‌کند. به بیان دیگر بسیاری از فرایندهای فیزیکی، روندی افزایشی توام با اشباع نشان می‌دهند. این روند بخصوص در موردفرآیندهایی که بامنابع محدود مشخص می‌شوند ازقبیل فرآیندهای تولید و مصرف نفت و گاز و غیره صادق است زیرا پس از آنکه این فرآیند روند رشد ابتدایی خود را پشت سرگذاشت محدودیت منبع، روند رشدآتی را به تدریج کند و سپس متوقف می‌سازد. ازجمله روابطی که برای نشان دادن رشد چنین کمیتهایی پیشنهاد شده رابطهٔ زیر است که "ریموند پرل" ۳ و لاول رید "۴ مستقلا" پیشنهاد کرده اند و به طور وسیعی به کار رفته است و عموما" به منحنی نماد منطقی ۵ معروف است.

$$\frac{dZ(t)}{dt} = kZ(t)\left[Z_\infty - Z(t)\right] \qquad (۷)$$

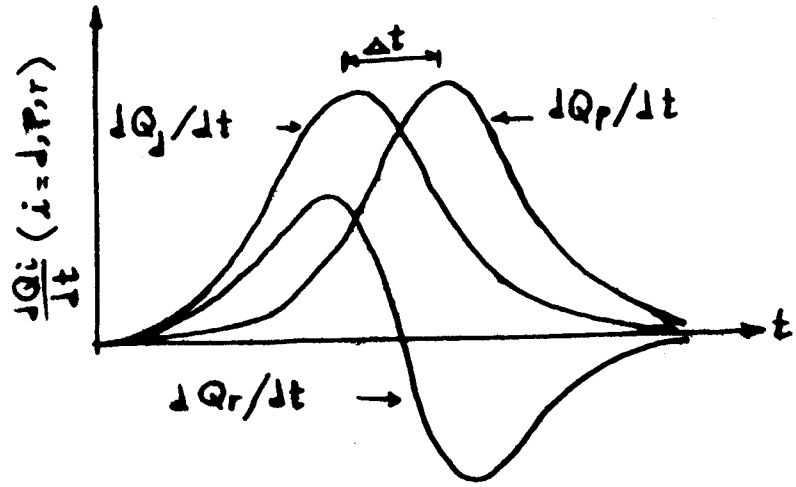
که دراینجا $Z_\infty$ مقدار نهائی (حد اشباع) کمیت Z است.

در مورد منابع نفتی می‌توان $Z(t)$ را با انباشتهٔ اکتشافات $Q_d$ و نیز انباشتهٔ تولید Qp برابر گرفت [۱]. مقصود ازانباشتهٔ اکتشافات میزان کل منابع نفتی کشف شده تازمان t است. انباشتهٔ تولید نیزبیانگرمیزان کل نفت استخراج شده از

1-Attracting 2- Repulsing 3- Raymond-Pearl 4- Lowell-Read 5- Logistic Curve
6- Cumulative-Discoveries 7- Cumulative-Production




شکل (۱) روندکلی تغییرات انباشتهٔ اکتشافات ، تولید وباقیماندهٔ ذخایر




شکل (۲) روندکلی میزان‌سالیانهٔ اکتشافات

آغازتازمان t است .تفاوت این دوکمیت در هر لحظه باقیمانده ذخائر مطمئن $Q_r^6$ است .

$$Q_d(t) = Q_p(t) + Q_r(t) \qquad (8)$$

شکل (۱) تغییرات این کمتیها را با زمان نشان می‌دهد .

ملاحظه‌می‌شودکه فاصلهٔ زمانی‌بین‌انباشتهٔ‌اکتشافات و انباشته‌تولید ،معمولا "زمانی به حداکثرمی‌رسد که باقیماندهٔ ذخائر مطمئن هم به بیشترین مقدار خود رسیده باشد .باید دانست که تغییرات‌باقیمانده ذخائر مطمئن $\frac{dQ_r}{dt}$ ازآن‌نقطه به بعد منفی است .

باید توجه داشت که میزان اکتشاف یا تولید سالیانه در واقع مشتق منحنیهای $Q_p$ و $Q_d$ است و مشتق $Q_r$ نیز تغییرات سالیانه درباقیماندهٔ ذخائر مطمئن را نشان می‌دهد . در شکل (۲) مشتق این کمیات نشان داده شده است . البته منحنی نمایش تغییرات واقعی این کمیتها شامل نوساناتی هم هست که بر اثر عوامل تصادفی و تغییرات در شرایط بازار از قبیل بهای نفت خام و بهای منابع انرژی قابل جایگزینی‌و وضعیت اقتصادی‌جهان از قبیل رونق و رکود ، ملاحظات سیاسی و نیز عوامل فنی مربوط به استخراج و نگهداری از چاههای نفت و غیره است که در الگوی ساده شده در نظر گرفته نشده‌اند .

1- Remaining Proved Reserve

حال ، مسالهٔ تولید نفت را در نظر می‌گیریم .دراین صورت از رابطهٔ ( 7 ) می‌توان استفاده کرد و نوشت .

$$dQ_p=\lambda Q_p(1-\frac{Qp}{Q_\infty})dt$$

ویا

$$dz(t)=\alpha z(t)\left[1-\beta z(t)\right]dt \qquad (9)$$

همان گونه که قبلا "اشاره شد نمایش کمیت تولید به صورت گسسته به حقیقت نزدیکتر است ، بخصوص که کلیهٔ آمارهای موجود برای مقاطع گسستهٔ زمان ( روز ، ماه و سال ) ارائه می‌شود بنابراین بسیار مناسب است که ماهم در اینجا از شکل منفصل معادلهٔ نماد منطقی به شکل زیر استفاده‌کنیم .

$$y_{n+1} = ay_n(1-by_n)$$

در رابطهٔ $y_n$(10) معرف تولید نفت در مقطع زمانی nام است .

b پارامتری است که اکتشافات وتغییرات قیمت درآن ملحوظ شدهٔ وa پارامتر مربوط به رشد صنعتی و تقاضای نفت است .

و بالاخره با یک تغییر مقیاس $X_n = by_n$ معادلهٔ تفاوتی زیر را که معرف ساده ترین نماد منطقی است به دست می‌آوریم :

$$X_{n+1} =aX_n(1-X_n) \qquad (11)$$

این الگوی‌ساده می‌توانددر مورد پیش بینی روندآیندهٔ تولید و مصرف نفت و منابع دیگر به کار رود و اهمیت استفاده از این مدل بخصوص در برنامه ریزی اقتصادی کشور که اتکای زیادی به عواید نفتی کشور دارد ملاحظه می‌شود .

**۴– بررسی جوابهای پایدار معادلهٔ نماد منطقی رشد ، هرج و مرج و دو شاخه شدن ۱**

شاید ساده ترین مثال از سیستمهای دینامیکی غیر خطی همان سیستم نمایش داده شده بامعادله نماد منطقی رشد باشد که با معادلهٔ تفاوتی زیر توصیف می‌شود :

$$X_{n+1} = aX_n(1-X_n) \qquad (11\text{– مکرر})$$

این معادله مقادیر آیندهٔ متغیر ( تولید نفت ) $X_{n+1}$ را در مرحلهٔ زمانی $n+1$ از روی مقادیر قبلی در مرحلهٔ n تعیین می‌کند . تحولات زمانی $X_n$ که با این معادلهٔ جبری ساده‌نمایش داده می‌شودخودیک تبدیل غیرعادی وشگفت‌آور ۲ است که هرچه مقدار پارامتر a که میزان غیر خطی بودن را می‌سنجد افزایش یابد از وضعیت عادی به سمت هرج ومرج پیش خواهد رفت .

با نوشتن معادلهٔ (۱۱)در شکلی متفاوت به صورت $X_{n+1}=aX_n-aX_n^2$ می‌بینیم که این یک معادلهٔ درجهٔ دوم ساده است که دو جزء خطی و غیر خطی دارد .وقتی که مقدار اولیهٔ $X_o$ به اندازهٔ کافی کوچک باشد ( در مقایسه با " ۱ " روی مقیاس نرمالیزه شده ، روشن است که در مقیاس نرمالیزه شده " ۱ "می‌تواند بیانگر هر عدد دلخواهی ، مثلا " ۱ میلیون بشکه نفت باشد ) آنگاه جمله غیر خطی معادله در ابتدا قابل صرف نظر کردن است . پس تولید در مرحلهٔ زمانی (سال) $n=$ ۱ تقریبا " برابر $aX$ خواهد بود .

اگر $a<1$ باشد تولید کاهش و اگر $a>1$ باشدتولید افزایش می‌یابدبنابراین جملهٔ خطی‌معادلهٔ مزبور را می‌توان به عنوان میزان و نرخ ترقی یا تنزل خطی تولید و تفسیر کرد . اگر $a>1$ باشد تولید تا آنجا بالا می‌رود که‌سرانجام جملهٔ غیر خطی $-aX_n^2$ نیز حائز اهمیت می‌شود . چون این قسمت غیر خطی منفی است نشان دهنده نرخ تنزل غیر خطی در تولید است که هنگام خیلی زیاد شدن تولید تفوق می‌یابد و باعث پائین آمدن تولید می‌شود . همانگونه که قبلا " اشاره شد معادلهٔ (۱۱) در واقع یک نگاشت است :

$$X_n \longrightarrow aX_n(1-X_n)$$

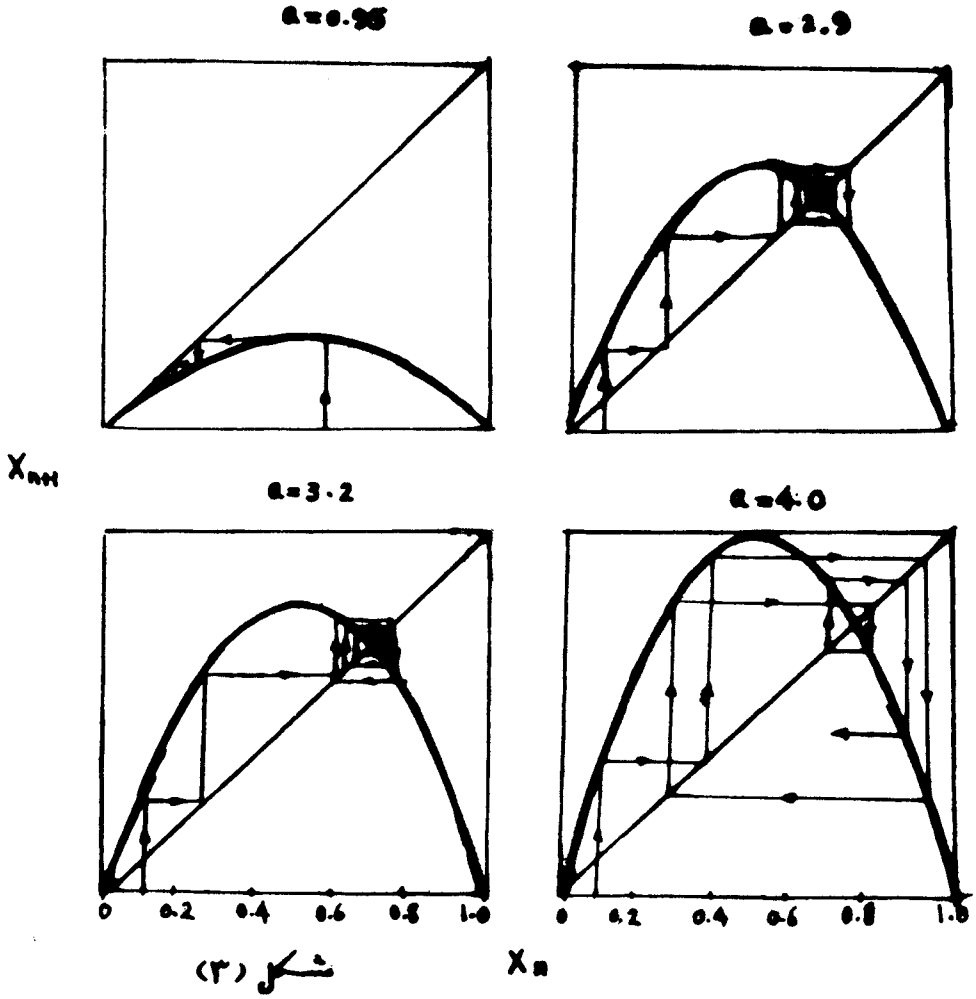
و دینامیک این نگاشت مستقیما " وابسته به پارامتر a است . برای فهم بهتر این دینامیک بهتر است از روش ترسیمی " دیاگرام لامری" که در آنالیز عددی مطرح است کمک بگیریم .

منحنیهای $X_{n+1}$ برحسب $X_n$ را که در شکل (۳) به ازای چهار مقدار مختلف a ترسیم شده‌اند ملاحظه کنید . این منحنیها اصطلاحا " "نگاشت برگشتی "۳ نامیده‌می‌شوند .

معادلهٔ (۱۱) معرف یک سهمی واژگون است که محور $X_n$ را در نقاط " ۰ "و" ۱ "' قطع می‌کندو مقدار حداکثر آن که برابر $X_{n+1}=\frac{a}{4}$ است در $X_n=$ ۰/۵ واقع می‌شود . از نگاشت برگشتی بدون انجام هیچگونه محاسبه‌ای می‌توان به یک درک کیفی از دینامیک معادلهٔ نماد منطقی دست یافت .مقادیر متوالی تولید از دنبال کردن خطوط روی این منحنیها پیدا می‌شوند . روش کارچنین است :

نوک مداد خود را بر روی یک مقدار اولیه مثل $X_o$ قراردهید سپس به طور عمودی‌حرکت کنید تا به سهمی برخورد کرده نقطه $X_1$ به دست آید . از این نقطه بایست به طور افقی برگردیدتا اینکه به خط باشیب $45^o$ برسید ازاینجا مجددا "

1- Bifurcation 2- Exlraordinary 3- Return map




شکل (۳)

خطی قائم می‌کشید تا سهمی را در نقطه‌ای مثل $X_2$ قطع کند و این کار را مرتبا " ادامه می‌دهید تا به جواب برسید .

این تجزیه و تحلیل تصویری به ما می‌گوید که اگر تولید اولیه را از مقدار نرمالیزهٔ واحد بزرگتر انتخاب کنیم ، خیلی فوری و تنها در یک مرحلهٔ مقدارش منفی خواهد شد . به علاوه اگر $a>4$ باشد ، مقدار حداکثر سهمی از " ۱ " بیشتر خواهد شد که در نتیجه این امکان پدید می‌آید که با مقدار اولیهٔ حدود 0.5 ، تولید طی دو وهلهٔ زمانی نابود شده‌به صفر بگراید .بنابراین مادر بررسیهایمان چون با عالم‌واقعیت سروکار داریم ، نه یک آنالیز مجرد و انتزاعی ، خود را به حالتی محدود می‌کنیم که شرایط بالا پیش نیاید ، یعنی فرض می‌کنیم :

$$0 < a < 4$$
$$0 < x_o < 1$$

همان گونه که شکل (۳) نشان می‌دهد : برای‌مقادیر $a<1$ تولید همواره به مقدار صفر کاهش می‌یابد .این موضوع به ازای $a = ۰/۹۵$ در شکل مورد بحث مجسم شده است . تقاطع سهمی با خط به شیب $۴۵^\circ$ در $X_n = ۰$ نشاندهندهٔ نقطهٔ پایدار دراین نگاشت است . به دلیل کوچک بودن a در این وضعیت می‌توان از تئوار اختلال[1] استفاده و تحقیق کرد که تقریبا "به ازای تمام مقادیر اولیهٔ $X_o$ تولید به‌سمت نقطهٔ تعادل پیدار صفر گرایش پیدامی‌کند و منسوخ‌می‌شود . به‌ازای $a>1$، به هر حال این نقطهٔ تعادل ،ناپایدارخواهد شد ( این‌امر به سادگی با دنبال کردن مسیرها روی دومین منحنی از شکل (۳) یا از به کارگیری تئوری اختلال به ازای مقادیر کم متغیر تولید ، قابل تحقیق است . ) در این حالت نقطهٔ تقاطع سهمی با خط شیب $۴۵^\circ$ در نقطه $X^* = 1 - \frac{1}{a}$ اتفاق می‌افتد که متناظر با یک نقطهٔ تعادل پایدار جدید

1- Perturbation Theory

است ، و با توجه به رابطهٔ (۶) داریم :

$$\lambda^{(1)} = \left(\frac{dF}{dX}\right)_{X^*} = 2-a$$

روشن است که درمحدودهٔ تغییرات $0<x<1$ نقطه تعادل مورد بحث پایدار خواهد بود و پاسخ یک سیکل جذب کننده خواهد بود اگر و فقط اگر $1<a<3$ باشد . یعنی تنها در این حالت است که مقدار اولیهٔ تولید ( متغیر $X_n$ ) هرچه باشد .درحالت مانا[3] متغیر تولید به سمت یک میزان خاص ( نقطهٔ تعادل $X^*$ ) نمو می‌کند .

هنگامی‌که a افزایش می‌یابد : $3<a<4$ ، رفتار دینامیکی به نحوقابل توجهی تغییر می‌کند .ابتدانقطهٔ تعادل ناپایدارمی‌شود و سپس متغیر تولید به سوی یک حالت مانا می‌رودکه دراین حالت‌بین‌دو مقدارباً کم و زیاد تغییرمی‌کند . یک دنبالهٔ زمانی‌که به سمت چنین حالت متناوب با دورهٔ ۲ کشیده شده است در شکل (۳) به ازای پارامتر $a=3/2$ به تصویر درآمده است دراین وضعیت خاص، سرانجام ، تولید بین دو مقدار $X_n=0/5$ و $X_n=0/8$ دور می‌زند و ممکن‌است این دورزنی سالها طول بکشد .

وقتی مقدارپارامتر a بیشتر می‌شوداین سیکل بادورهٔ ۲ ناپایدار شده جای خود را به یک سیکل با دورهٔ ۴ می‌دهد که دراین‌وضعیت میزان تولید بالا و پائین می‌رود و بعد از چهار مرحلهٔ زمانی به مقدار اولیهٔ خود می‌رسد و این‌کارتکرار می‌شود . همین طور که کم کم a زیاد می‌شود رفتار دینامیکی هم تغییر می‌کند و متغیر تولید در دراز مدت به سیکلهایی با دوره های ۸، ۱۶، ۳۲، ۶۴و۰۰۰۰ ( $2^K$ ) همگرا می‌شود و نهایتا " انبار شدن و جمع شدن سیکلهای با دورهٔ محدود تا مقدار پارامتر $a=a_c = 3/5700$ ادامه پیدا می‌کند . این پدیدهٔ زیبای دو برابر شدن دورهٔ سیکلها که معرف دو شاخه شدن مقدار $X_n$ است اصطلاحا " "دو شاخه شدن دو برابر کنندهٔ دورهٔ تناوب" نامیده می‌شود . این رفتار در حالت مانا ، برای معادلهٔ نماد منطقی به وضوح در شکل (۴) نشان داده شده است .

همان طورکه در شکل زیر نمایان است ، مقادیرتولید در حالت مانا به عنوان تابعی از پارامتر a که بین ۳/۵ و ۴ تغییر می‌کند ترسیم شده است .

به ازای مقادیر $a<3$ تنها یک حالت مانا که برابر $X^* = \frac{a-1}{a}$ است : وجود دارد اما برای مقادیر $a \geq 3$ ما ابتدا دو مقدار ، بعد ۴ مقدار ، سپس ۸ مقدار و همین طور $2^K$ مقدار مانا برای متغیر تولید به دست می‌آوریم یعنی دراین‌وضعیت سیکلهای پایدار یا دورهٔ تناوب $2^K$ به وجود می‌آیند .

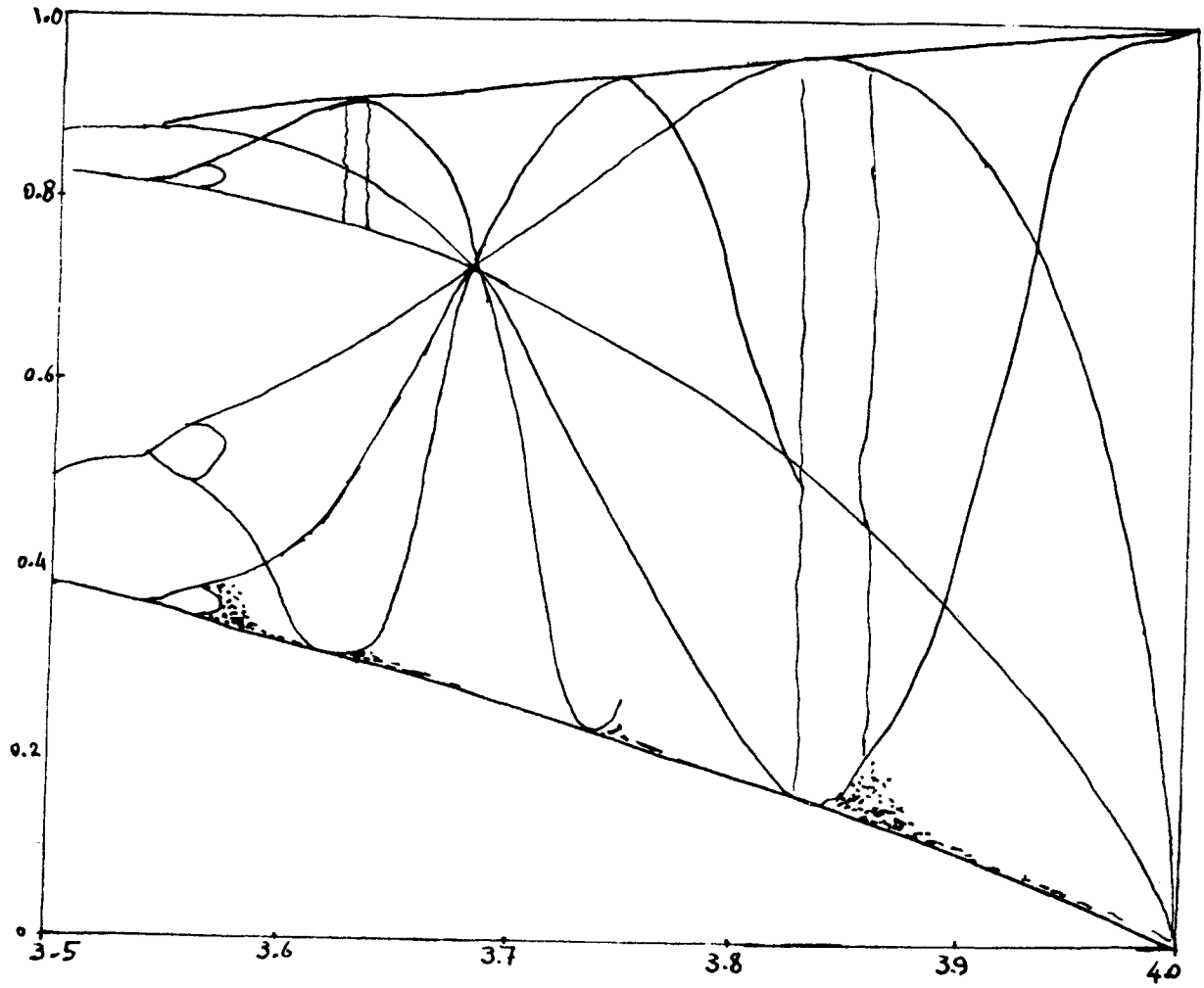
هردوشاخه شدن درشکل (۴) نشان دهندهٔ دوبرابر شدن مقادیرحالت مانا وهمچنین دو برابر شدن فاصله‌زمانی تناوبهای متوالی است .

حوزهٔ مقادیر a که به ازای آنها هر کدام از سیکلها پایدار بماند بازیاد شدن دورهٔ متناوب این سیکلها به‌شدت کم می‌شود . در حقیقت این سلسلهٔ دو برابر شدن دورهٔ سیکلهای‌تولیدراآزمایشهای‌عددی‌ومشابه سازیهای‌کامپیوتری نشان‌داده است‌و به کمک نتایج همین‌آزمایشها "فیکن‌بوم "[1] توانست اثبات کند که فاصلهٔ بین سیکلهای پایدار به‌صورت هندسی کم می‌شود و نرخ این تصاعد تقریبا " برابر ۴/۶۶۹۲۰۱۶ است . اهمیت شگرف این کار این است که‌نرخ تصاعد هندسی مزبور و سایر خواص دو برابر شدن دورهٔ نوسانات و دو شاخه شدن را عالمگیر می‌داند بدین معنی‌که این امور و پدیده هادر رفتار دینامیکی هرسیستمی که‌بتواند تحقیقا " یا تقریبا " با یک نگاشت غیر خطی درجهٔ دوم مدلسازی شود ظاهر می‌شوند .[۷]

رسیدگی به پدیدهٔ دو برابر شدن دورهٔ نوسانات در سیستمهای غیر خطی یک مثال عالی ازهمان پیوند و هماهنگی بین آزمایشهای عددی و نگرهٔ تحلیلی است . که قبلا "بدان اشاره کردیم . به هر حال این دنبالهٔ مداد ۲های متناوب منظم فقط یک منادی برای پدیدهٔ "هرج و مرج " است زیرادو برابر شدن دورهٔ نوسانات خط سیر برای‌رسیدن به هرج و مرج است .پدیدهٔ دو شاخه شدن هم اکنون‌موضوع مقاله های تحقیقاتی زیادی است .[۸و۷]

ما اکنون به سوی مقادیر بزرگتر پارامتر a پیش می‌رویم تا هرج و مرج را به درستی در رفتار دینامیکی معادلهٔ نماد منطقی مدل تولید نفت ببینیم . برای خیلی از مقادیر پارامتر $a>3/57$ دیاگرام دو شاخه شدن نشان می‌دهد که رفتار متغیر $X_n$ در دراز مدت غیر متناوب است و در فواصل پیوسته X تغییر حرکت می‌کند .همان گونه که

1- Steady State
2- Period-doubling bifurcation
3-Felgenbaum,M.J.
4- Orlul
5- Slochastic Process




شکل (۴)

نشان خواهیم داد هرچندمعادلهٔ نماد منطقی رشد کاملا " معین و یقینی‌است یعنی هیچ عامل تصادفی درآن‌وجودندارد و با داشتن مقداراولیه $X_0$ آینده کاملا " قابل تعیین است اما تحول تولید در فواصل پیوسته X به روشنی از فرآیندهای اتفاقی ۳ قابل تمیز نیست .

برجسته ترین عامل مرتبط با هرج و مرج ، پیدایش سیکلهای با دورهٔ ۳ است که به ازای $a=3/83$ ظاهرمی‌شوند . دراین حالت ، تولید طی دو سال متوالی افزایش و سپس در سال سوم کاهش می‌یابد .به علاوه همان طور که مقدار پارامتر a افزایش می‌یابد ،همین سیکلهای با دورهٔ ۳نیزدچارپدیدهٔ "دوشاخه شدن دو برابر کننده دورهٔ تناوب " می‌شوندیعنی سیکلهای با دورهٔ ۶و ۱۲ و ۲۴ و ... ($3\times 2^K$) پدید می‌آیند . در حقیقت بین $a_c$ و $a=3/82$ دریچه هایی[۱۴] از پایداری برای هر سیکل با دورهٔ تناوب صحیح وجوددارد که مسالهٔ دو برابر شدن دورهٔ نوسانات را به رفتار هرج و مرج گونه منتهی می‌کند منتهی این دریچه ها آنچنان‌کوچک و باریک هستند که بر روی شکل (۴) قابل روئیت نیستند اما در جدول (۲) تا حدودی مشخص شده‌اند .

این‌حقیقت ریاضی قابل تذکر است که هرچندفواصل پایداری‌خیلی‌غلیظ ومتراکم هستند ،درست‌نیست‌که‌چنین استنتاج کنیم که محدودهٔ مقادیر a که حقیقتا " به رژیم هرج و مرج گونه منجر می‌شود خیلی کوچک است . برعکس ثابت شده است که این محدوده یک اندازهٔ محو نشدنی[۱] دارد ۶ به عبارت دیگر اگرمقدار دقیق $X_c$ هرج و مرج گونه شود ،آنگاه سیکلهای خیلی طولانی‌و درعین حال متناوب‌خواهیم داشت . بخصوص رفتار دینامیکی نامنظم‌وبی قاعده و هرج و مرج گونه که تمام‌گسترهٔ " ۰ "تا " ۱ "رادربرمی‌گیرد ،به ازای $a=4$ بوجود می‌آید و پس از آن ناحیه هرج و مرج خاتمه می‌یابد .

جدول (۲) : یک کاتولوک از سیکلهای معادلهٔ نماد منطقـــــی [۸]

| مقدار پاژامتـــــر a که : | | | |
|---|---|---|---|
| محدودهٔ جذب کنندگی سیکل | دنبالهٔ سیکلها با دورهٔ $k^{my}$ هر ناپایدار می‌شوند | اولین سیکل پایه ناپایدار می‌شود | اولین سیکل پایه‌ظاهر شده | دورهٔ تناوب سیکل پایه |
| ۲/۵۷۰۰ | ۳/۵۷۰۰ | ۳/۰۰۰۰ | ۱/۰۰۰۰ | ۱ |
| ۰/۰۲۱۱ | ۳/۸۴۹۵ | ۳/۸۴۱۵ | ۳/۸۲۸۴ | ۳ |
| ۰/۰۰۱۱ | ۳/۹۶۱۲ | ۳/۹۶۰۸ | ۳/۹۶۰۱ | ۴ |
| ۰/۰۰۴۸ | ۳/۷۴۳۰ | ۳/۷۴۱۱ | ۳/۷۳۸۲ | ۵ (a) |
| ۰/۰۰۰۹ | ۳/۹۰۶۵ | ۳/۹۰۶۱ | ۳/۹۰۵۶ | ۵ (b) |
| ۰/۰۰۰۰۶ | ۳/۹۹۰۳۲ | ۳/۹۹۰۳۰ | ۳/۹۹۰۲۶ | ۵ (c) |
| ۰/۰۰۶۲ | ۳/۶۳۲۷ | ۳/۶۳۰۴ | ۳/۶۲۶۵ | ۶ (a) |
| ۰/۰۰۰۱۳۳ | ۳/۹۳۷۶۴۹ | ۳/۹۳۷۵۹۶ | ۳/۹۳۷۵۱۶ | ۶ (b) |
| ۰/۰۰۰۰۴۰ | ۳/۹۷۷۸۰۰ | ۳/۹۷۷۷۸۴ | ۳/۹۷۷۷۶۰ | ۶ (c) |
| ۰/۰۰۰۰۰۳ | ۳/۹۹۷۵۸۶ | ۳/۹۹۷۵۸۵ | ۳/۹۹۷۵۸۳ | ۶ (d) |

پس به طور خلاصه حل‌معادلهٔ نمـــاد منطقـــــی $X_{n+1}=aX_n(1-X_n)$ منجربه پاسخهای متفاوتی به شرح‌زیر می‌شود

نقاط پایدار وجود دارند : $1 < a < 3$

سیکلهای پایدار با دورهٔ $2K$ پدیدار می‌شوند : $3 < a < 3/57$

رژیم هرج و مرج گونه ظاهر می‌شوند : $3/57 < a < 4$

به ازای $a = a_c = ۳/۵۷۰۰$ بی نهایت مدار متناوب و متمایز ظاهر خواهد شد در حالی که به ازای $a=۳/۰۰$ کـه نقطهٔ " دو شاخه شدن لرزان "[1] است تولید در فواصل‌زمانی معینی شروع به نوسان می‌کند. [۹]

یکی از وجوه قابل توجه دیاگرام دو شاخه شـــدن (شکل ۴) نوارهای تاریک و پررنگی است که مرزهای بالائی و پائینی و تقاطع حوزهٔ‌رفتار هرج‌و مرج گونه رانشان می‌دهند. این نوارهای پررنگ مقادیری از $X$ را نشان می‌دهند که‌احتمال وقوع آنها هنگام بروز هرج و مرج بیشتر است.

این ساختار مرتب به طور آزمایش و تجربی از روی شکلهای بادقت بسیار عالی کشف شده است،مثلا " شکل (۴) حاصل صدهابلکه هزاران مرتبه تکرارحل معادلهٔ‌نماد منطقی و ترسیم پاسخهای مربوط به آن است.

به علاوه کشف شده‌است که نوارهای مذکـــــور بیشتر در حول وحوش مقدار بحرانی تولید یعنی $X_n=۰/۵$ واقع شده‌اند. محدودهٔ بالایی $X_n$ را ارتفاع سهمی‌واژگونه یعنی $X_1 = \frac{۹}{۴}$ تعیین می‌کندو مرز پائینی و دیگرنوارهای داخلی را تکرارهای متوالی مشخص می‌سازد.

دلیل اینکه احتمال تولیدبه ازای $X_o=۰/۵$ بیشتر است این است که شیب سهمی در نگاشت برگشتی (شکل ۳) دراین نقطه کاهش می‌یابدو باعث می‌شودکه مسیرهای‌حالت دراین محدوده متراکم شوند. به علاوه محل تلاقی نوارهای پررنگ در شکل (۴) مربوط به بحران[3] در رفتار دینامیکی هرج و مرج گونه می‌شود و درآنجا فواصل گسیختهٔ‌مدارهای

1- Nen Vanishing measure 2- Flip bifurcation point

3- Crises

هرج و مرج گونه باهم تلاقی می‌کنند و ناحیهٔ بزرگتری پدید می‌آید. تماشایی ترین نقطهٔ بحرانی به ازای $a = ۳/۶۷۸۶$ به وجود آمده که در شکل مورد بحث مشهود است. قابل ذکر است که دراین نقطه اولین سیکل با دورهٔ زوج آشکارمی‌شود. حال برای تمیز "هرج ومرج" از یک "فرآیند اتفاقی" چه باید کرد؟

میدانیم سیستمهای دینامیکی که درآنها عوامل تصادفی به اندازهٔ کافی وجود داشته باشد سیستمهای کرلموگروف[1] یا سیستم K- نامیده می‌شوند. این سیستمها به اندازهٔ کافی تصادفی و بی قاعده عمل می‌کنند که توصیفات آماری درمورد آنها صادق باشد. سیستمهای کولموگروف یک خاصیت ریاضی دارند که "آمیختگی"[2] با "آنتروپی مثبت گرلموگروف ـ سینائی"[3] نامیده می‌شود این "آمیختگی" خصوصیت دقیق و ظریفی است که مشابه آن را می‌توان هنگام مخلوط کردن خامه با قهوه ملاحظه‌کردکه البته تحقیق آن دریک‌سیستم دینامیکی بسیار مشکل است.

در هر حال، آمیختگی عملا" بدین معنی است که سیستم دینامیکی فوق العادهٔ به شرایط اولیه حساس است به طوری که حتی دو مسیر حالت با شرایط اولیه نزدیک به هم ممکن است‌به طور نمایی از هم دور شوند. این نرخ رشددوری یا نزدیکی مسیرهای حالت با "توان متوسط لیاپانوف"[4] که معادل با "آنتروپی کولموگروف" است قابل اندازه گیری و محاسبه است. [۱۰]

ما اکنون می‌توانیم‌هرج و مرج را چنین معرفی کنیم:

" هرج و مرج"، رفتار یک سیستم دینامیکی غیر اتفاقی و یقینی است که دارای آنتروپی مثبت کولموگروف و یا به‌طور معادل دارای توان متوسط مثبت لیاپانوفی باشد.

برای مثال، در یک نگاشت یک بعدی (مثل معادلهٔ نماد منطقی رشد) که به صورت‌کلی $X_{n+1} = F(X_n)$ است توان متوسط لیاپانوف چنین تعیین می‌شود. [۶]

$$\lambda = \lim \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \ln\left(1\left|\frac{dP}{dX}\right| X_n\right) \qquad (۱۲)$$

شکل (۵) منحنی $\lambda$ را برحسب a نشان می‌دهد. البته‌دراین شکل مقدار پارامتر a در همان حوزه‌ای که برای دیاگرام دو شاخه‌شدن (شکل ۴) انتخاب‌شده بود، درنظرگرفته‌شده‌است.

اکنون به روشنی رابطهٔ بین‌وقوع هرج‌و مرج‌بامقادیر مثبت توان متوسط لیاپانوف همچنین بین‌مدارهای متناوب‌با فرورفتگیهای تیز $\lambda$ ملاحظه می‌شود.

به طور مشخص به ازای $a=۴$، مقدار $\lambda$ به طوردقیق قابل محاسبه است. برای این کار مایک متغیر جدید به شکل زیرتعریف می‌کنیم‌و با این‌عمل در واقع از یک‌دستگاه‌مختصات به دستگاه دیگری می‌رویم:

$$y_n = \frac{2}{n} \sin^{-1}\left(\sqrt{X_n}\right)$$

دراین صورت معادلهٔ‌نماد منطقی، معادلهٔ (۱۱)، به‌نگاشت زیرکه اصطلاحا "آن را نگاشت‌خیمه‌ای[5] می‌نامند تبدیل می‌شود:

$$y_{n+1} = \begin{cases} 2y_n & : \ 0 \leq X_n \leq ۰/۵ \\ 2(1-y_n) & : \ ۰/۵ \leq X_n \leq 1 \end{cases} \qquad (۱۴)$$

از اینجا می‌بینیم که وقتی $\alpha=۴$ باشد به ازای تمام مقادیر X داریم: $\left|\frac{dF}{dX}\right| = \ln 2$

لذا دراین حالت

$$\lambda = \ln 2 = 0/693 > 0$$

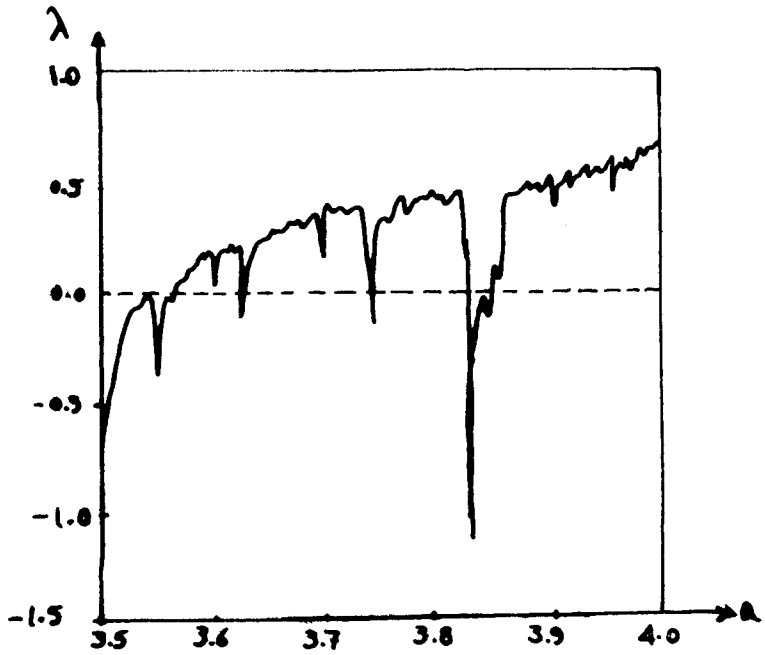
چون مقدار انتروپی کولموگروف مستقل از دستگاه مختصات است. [۱۱]، نتیجه می‌گیریم که معادلهٔ نماد منطقی با پارامتر $a=۴$ مبین یک سیستم K- است و بنابراین دارای تعریف سیستم‌دینامیکی هرج و مرج گونه هم‌هست. همچنین می‌توان به طور قاطع نشان داد که به ازای تمام مقادیر $a>ac=۳/۵۷۰۰$ مقدار توان متوسط لیاپانوف‌یعنی $\lambda$ مثبت است و در نتیجه سیستم رفتار هرج و مرج گونه دارد.

در مورد سیستم مورد بحث ما سیستم تولید نفت، مقدارa براساس جدول (۱) قابل محاسبه است. با توجه به رابطهٔ (۱۰) می‌توان رابطهٔ زیر را برای محاسبهٔ پارامتر a از میان دادهای آماری به دست آورد.

$$a = \frac{y_{n+1}^3 - y_{n+2}\, y_n^2}{y_n y_{n+1}(y_{n+1} - y_n)} \qquad (۱۵)$$

براساس اطلاعات مربوط به انباشته اکتشافات نفت و انباشتهٔ‌تولید نفت که از سال ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ در جدول مزبور مندرج است و با توجه به رابطهٔ (۱۵) ملاحظه می‌شود

1- Kolmogorov 2- Mixing 3- Positive Kolmogorov Siaatentropy
4- Average Liapunov exponent 5- Tent Map




شکل (۵)

که طی بیست سال مزبور، اگر هر مرحلهٔ زمانی، برابر ۱۰ سال انتخاب شود آنگاه

$$a = ۳/۲۴۱$$

یعنی براساس این بحث ریاضی، بایستی میزان تولید ونفت در نتیجه قیمت‌آن دچار نوسان دو شاخه‌ای شده باشد کـــه واقعیات تاریخی نیز گواه همین امراست.

**۵ـ نتیجه گیـــری**

تغییرات نوسانی به بازار انرژی باعث ایجادعوارض نامطلوب اقتصادی در سطح جهانی می‌شود. اگر این عوارض در مورد کشورهای پیشرفته به صورت کاهش کاراین قتصادی‌و دور شدن از عملکرد منطقی بازار بین المللی انرژی ظاهر می‌شود، در مورد کشورهای توسعه نیافته و بخصوص در مورد کشورهای تولید کننده نفت تاثیر نوسانات بازار انرژی ممکن است چنان مهلک باشد که امکان هر نوع برنامه ریزی شده و توسعه را از این کشورها سلب کند و متناوبا " بحرانهای‌کمبود ظرفیت و مسائل و مشکلات مربوط به زیربنای اقتصادی کشـور را از یک طرف و بیکاری و رکود مزمن و دامنه دار را از طرف دیگر سبب شود. بنابراین شناخت عواملی که می‌توانند بازار انرژی‌را ناپایدار سازند حائز اهمیت است. دراین مقاله‌کوشش شده است‌نشان‌داده شود که علاوه برعوامل سیاسی‌واقتصادی دینامیزم داخلی بازار انرژی نیز امکان دارد خود به صورت یک عامل ناپایدار کننده ظاهر شود. براساس این استدلال، در عرض سعی دریافتن علل اقتصادی برای کاهش طولانی قیمت‌انرژی از سالهای دهه ۱۹۶۰ و افزایش ناگهانی آن در دهه ۱۹۷۰ و کاهش به همان‌اندازه ناگهانی‌آن‌به دهه ۱۹۸۰، می‌توان این نوسانات را براساس عوامل دینامیکی که باعث عدم ثبات بازار انرژی می‌شوند توضیح داد. البته الگوی پرل وریدکه با معادله های (۷) الی (۱۱) به صورت ریاضی نمایش داده شده است یک الگوی بیش از حد ساده شده‌است و پیچیدگی سیستم‌بازار بین المللی‌انرژی را که میزان عرضه و تقاضا و قیمت نفت و انواع دیگر انرژی را تعیین می‌کند به هیچ وجه به طور کامل منعکس نمی‌سازد. اما همین الگوی ساده شده وتعینی‌نشان دهنده این حقیقت است که عامـل برهم زننده ثبات و پایداری سیستم‌را باید در درجه اول‌در افزایش بیش از حد نرخ رشد تولید و مصرف انرژی جستجو کرد و اگر این نرخ رشد درآینده بازهم افزایش یابد به‌جای نوسانات‌ادواری ساده دربازار انرژی بایدنوسانات پیچیده‌تر با دوره های تناوب بزرگتر و در نهایت هرج و مرج کامل را در بازار انرژی انتظار داشت. هنگامی که سیستم وارد این حوزه از عملکرد خود بشود رفتار آن عملا " شبیه به رفتار یک سیستم تصادفی خواهد شد و بنابراین امکان هرگونـــه پیش بینی و براساس آن امکان هر نوع برنامه ریزی کاملا " سلب می‌شود. در خاتمه لازم است بار دیگر تاکید شود که

دراین مقاله پدیده هرج و مرج فقط در مورد یک الگوی ساده و تقریبی ازدینامیزم بازار انرژی بررسی شده است و بنابراین نتایج حاصل از آن را باید در درجه اول به صورت کیفی و نه کمی ملاحظه کرد. با وجود این می‌توان ادعا کرد که بررسی انجام شده وجود رابطه‌ای مستقیم مابین افزایش نرخ رشد تولید و مصرف انرژی و وقوع پدیده هرج و مرج را نشان داده است واین را باید به صورت هشداری‌تلقی کرد که اگر به موقع مورد توجه قرار نگیرد امکان دارد در آینده خساراتی جبران ناپذیر را باعث شود.

## فهرست منابع :

۱ــ لوکس، کارو و افشار برکشلو، علی : کاربردالگوی پرل ورید دربررسی منابع نفتی ایران نشریه دانشکدهٔ علوم ــ دانشگاه تهران ، جلد سیزدهم ، پاییز و زمستان ۱۳۶۲ .

۲ــ صفاریان ، مسعود : " گزارش هفتمین گردهمائی انرژی اکسفور ــ دوم تا سیزدهم سپتامبر ۱۹۸۵ " نشریهٔ انرژی شمارهٔ ۹و۱۰ سال سوم ، آذر و دی ۱۳۶۴ .

۳ــ الچلابی ، فدهیل : " سخنرانی قائم مقام دبیر کل اوپک در مراسم افتتاحی اجلاس مشترک کمیسیون اروپا ، و اوپک مارس ۱۹۸۷ " ، مجله نفت و اقتصاد ، شماره ۷۵ ، خرداد ۱۳۶۶ .

4- T.Y.Li,J.A. Tork, "Period three implies Chaos", Amer. Math. Mon., Vol. 82, pp. 985-992,1975.

5- Yu. M.Svierezlov, D.O. Logofet, "Stability of Biological Communities" Mir Publisher, Moscow, PP. 35-46, 1983.

6- Roderick V.Jensen,"Classical chaos", American Scientists, Vol. 75, No.2, PP. 168-181,Morch-April 1987.

7- M.J. Feigenbaum, "Universal behaviour in nonlinear Systems", Physica 7D, PP. 16, 1983.

8- R.M. May, "Simple mathematical models with very complicated dynamics", Nature 261, pp. 459, 1976.

9- J.Guekenheimer, P.Holmes, "Nonlinear Oscillations,Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector fields", New York, Springer, 1983.

10- Ya. B.Pesin, "Characteristic Liapunov exponents and Smooth ergodic theory", Russ. Math.Surv., PP. 32-55, 1977.

11- Ya.G. Sinai, "Introduction to ergodic theory", Princeton University Press.