بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

(مهندسی معدن- گرایش استخراج)

عنوان:

برنامه ریزی تولید میان مدت معدن مس سونگون بر اساس پیش بینی قیمت با استفاده از تئوری آشوب

نگارش:

علی سلطانی خبوشان

استاد راهنما:

دکتر اصانلو

استاد مشاور:

دکتر اکبرپورشیرازی

آبان ۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: علی سلطانی جنوبشان ☑ دانشجوی آزاد ○ بورسیه ○ معادل ○

شماره دانشجوئی: ۸۵۱۲۷۰۳۲ دانشکده: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک رشته تحصیلی: مهندسی معدن گروه:

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: مرتضی اصانلو درجه و رتبه: دکترا - پروفسور

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: محسن اکبرپور شیرازی درجه و رتبه: دکترا

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی: برنامه‌ریزی تولید میان مدت معدن مس سونگون بر اساس پیش بینی قیمت با استفاده از تئوری شوب

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Intermediate production planning of sungun copper mine of Iran based on copper predicted by chaos theory

نوع پروژه: کارشناسی ○ ارشد ☑ دکتر ○ سال تحصیلی: ۸۶-۸۷

کاربردی ☑ بنیادی ○ توسعه‌ای ○ نظری ○

تاریخ شروع: ۸۶/۲/۳۰ تاریخ خاتمه: ۸۷/۸/۱۲ تعداد واحد: ۶ سازمان تأمین کننده اعتبار:

واژه‌های کلیدی به فارسی: محدوده نهایی پیت، برنامه‌ریزی تولید، سری زمانی، تحلیل رگرسیونی، تئوری آشوب

واژه‌های کلیدی به انگلیسی: ultimate pit limit of mine, product scheduling, Time sieves, Regressive analysis, ChaosTheory

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات	تصویر ☑ جدول ☑ نمودار ☑ نقشه ○ واژه‌نامه ○	تعداد مراجع	تعداد صفحات ضمائم
	۱۱۲		۵۲	۱۳

زبان متن	فارسی ☑	انگلیسی ○	چکیده	فارسی ☑	انگلیسی ☑

یادداشت

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

تاریخ: ۸۷/۹/۶ ~~امضاء استاد راهنما:~~

۱: ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه

۲: ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

برگه تسویه حساب دانشجویان کارشناسی ارشد با اساتید

نام و نام خانوادگی دانشجو: علی سلطانی جیرسرک
شماره دانشجوئی: ۸۵۱۲۷۰۳۲
زمان دفاعیه: ۸۷/۸/۱۲
عنوان پروژه : برنامه ریزی تولید میان مدت معدن مس سونگون بر اساس پیش بینی قیمت با استفاده از تئوری آشوب
نمره پروژه :

تایید اساتید جهت تسویه حساب با دانشجو

سمت	نام و نام خانوادگی	امضاء
استاد راهنمای اول	مرتضی لطفی نژاد	
استاد ~~راهنمای دوم~~ مشاور	محسن کریمی شهرکی	
ژوری خارجی ~~استاد مشاور~~	دکتر حمزه عزام پور	
ژوری داخلی	عبدالله حیدری	
ژوری خارجی		

تقدیم به

﴿پدر عزیز و مادر مهربانم﴾

بایسته است تا بدین وسیله از استاد راهنمای محترم، آقای دکتر اصانلو که هیچگاه راهنمایی های خود را از اینجانب دریغ نداشتند و نیز از استاد مشاور محترم، آقای دکتر اکبر پور شیرازی و تمام عزیزانی که مرا در راستای انجام این پروژه یاری نمودند، تشکر و قدر دانی نمایم. همچنین بر خود لازم می دانم از زحمات آقایان دکتر رشیدی نژاد و مهندس نوید فرزام تبار تشکر ویژه داشته باشم.

چکیده

تعیین محدودهٔ نهایی پیت، به منظور برنامه ریزی تولید در معادن روباز امری اجتناب ناپذیر است. تعیین این محدوده جز با دانستن ارزش اقتصادی بلوک های ماده معدنی میسر نیست و برای این منظور می بایست عیار حد را تعیین کرد. از طرف دیگر پیش بینی قیمت محصول نهایی برای تعیین عیار حد ضروریست و از آنجا که تمام این مراحل مانند یک حلقه به هم وابسته اند ، هر گونه خطا در پیش بینی قیمت محصول نهایی باعث اختلال در تمام مراحل طراحی و برنامه ریزی خواهد شد.

روش های متعددی برای پیش بینی قیمت ها وجود دارند که از آن جمله می توان به روش های تحلیل رگرسیونی همچون روش ترند و روش سری های زمانی اشاره کرد. در روش ترند تنها بر مبنای اینکه قیمت ها طی سالیان گذشته روندی صعودی یا نزولی داشته اند پیش بینی انجام می گیرد. الگوی توضیحی در سری های زمانی، بیانگر تنوع رفتاری بیشتری از سری قیمت ها است و بر اساس همین جریان رفتاری، قیمت های آینده را پیش بینی می کند. اما این روش تنها ساختار دینامیک تصادفی قیمت ها را بیان می کند. با بیان اینکه رفتار تصادفی یک سیستم دینامیکی ممکن است به ظاهر تصادفی باشد و در حقیقت از فرآیندی غیرخطی و معین تبعیت کند، تئوری آشوب[1]، *وجود* چنین ساختاری را در سری زمانی قیمت ها جستجو می کند. در صورت وجود یک چنین ساختاری، پیش بینی قیمت های آینده به واقعیت نزدیک تر خواهد بود.

در این پروژه ابتدا با استفاده از تکنیک های موجود، آشوبناک بودن سری روزانهٔ قیمت ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که سری روزانهٔ قیمت های مس آشوبناک نیست و مدل سری زمانی ایجاد شده بهترین توضیح برای رفتار قیمت ها است. بنابراین بر اساس مدل سری زمانی ایجاد شده برای داده های روزانه، و نیز با شبیه سازی مونت کارلو، قیمت مس تا سال ۲۰۱۷ میلادی پیش بینی شد. همچنین به منظور یک ارزیابی جامع، سری زمانی ماهانه و سالانهٔ قیمت های مس نیز مورد مطالعه قرار گرفت تا قیمت های پیش بینی شده بر اساس هر کدام از سری ها با یکدیگر و نیز با قیمت های واقعی مقایسه شوند. با تحلیل بصری نمودار *ln-price* سالانه، یک جریان قطعی مرکب از یک روند کلی به همراه یک نظم درونی به چشم می خورد. بر اساس روند کلی موجود، قیمت ۵۰۰۰ دلار بر تن برای فلز مس برای ده سال آینده پیش بینی شد. در ادامه با وارد کردن مدل بلوکی ساخته شده توسط نرم افزار *Datamine* به نرم افزار *NPV scheduler* و نیز پارامترهای اقتصادی همچون قیمت فروش محصول نهایی، هزینه های استخراج، فرآوری و غیره، ابتدا مدل اقتصادی معدن مس سونگون ایجاد و سپس محدودهٔ نهایی و برنامه ریزی تولید معدن ارائه شده است. در نهایت پیت نهایی معدن با عمر ۳۴ سال و با سود خالص ۸۶۸ میلیون دلار تخمین زده شد.

کلمات کلیدی: محدودهٔ نهایی معدن، برنامه ریزی تولید، سری زمانی، تحلیل رگرسیونی، تئوری آشوب

[1] - *Chaos theory.*

فهرست مطالب

عنوان صفحه

مقدمه ۱

فصل اول: تئوری آشوب

۱-۱- آشوب ۷

۱-۲- تعریف ریاضی آشوب ۸

۱-۳- باز سازی فضای حالت ۹

۱-٤- آزمون های تشخیص آشوب ۱۱

۱-٤-۱- آزمون توان لیاپونوف ۱۱

۱-٤-۲- آزمون بعد همبستگی ۱۵

۱-٤-۳- آزمون بازگشت های نزدیک ۱۸

۱-٤-٤- آزمون BDS ۲٤

فصل دوم: پیش بینی قیمت مس

۲-۱- پیش بینی قیمت مس ۲۹

۲-۲- سری های زمانی ۳۰

۲-۲-۱- ایستایی ۳۰

۲-۲-۲- مدل های *ARMA* و *GARCH* ۳۲

۲-۳- نتایج پیش بینی ۳۸

۲-٤- عوامل تاریخی مؤثر بر قیمت مس ٤۸

۲-۵- رابطهٔ ذخایر جهانی مس با قیمت مس ٤۹

فصل سوم: معرفی معدن مس سونگون

۳-۱- موقعیت جغرافیایی ۵۲

۳-۲- تاریخچه اکتشافی معدن سونگون ۵۳

۳-۳- زمین شناسی معدن ۵٤

۳-٤- زمین شناسی ساختمانی ۵۵

۳-۵- کانی زایی ۵٦

۳-۵-۱- نوع پیرومتاسوماتیک ۵۷
۳-۵-۲- نوع پورفیری ۵۷
۳-٦- آلتراسیون ها ۵۹
۳-۷- پروژه‌های عمده طرح مس سونگون ٦۱

فصل چهارم: برنامه ریزی تولید معدن مس سونگون با استفاده از نرم افزار ***NPV Scheduler***

٤-۱- طراحی و برنامه ریزی معدن ٦٦
٤-۲- محدودهٔ نهایی پیت ٦۷
٤-۲-۱- روش های تعیین محدودهٔ نهایی پیت ٦۸
٤-۳- مدل های بلوکی ٦۹
٤-٤- برنامه ریزی برای تولید ۷۳
٤-۵- ترتیب معدنکاری بوسیله پوش بک ۷۳
٤-٦- ارتباط برنامه‌ریزی تولید با محدوده نهایی پیت و ارزش اقتصادی بلوک ۷٤
٤-۷- نرم افزار ***NPV Scheduler*** ۷۵
٤-۷-۱- داده های ورودی ۷۷
٤-۷-۲- وارد کردن مدل زمین شناسی ۷۷
٤-۷-۳- ساخت مدل اقتصادی ۷۸
٤-۷-٤- ساخت پیت نهایی ۸۲
٤-۷-۵- ایجاد پوش بک ها ۸٤
٤-۷-٦- بهینه سازی برنامهٔ تولید ۸۵

فصل پنجم: بحث و نتیجه گیری

۵-۱- بحث ۸۹
۵-۲- نتیجه گیری ۹۱
۵-۳- پیشنهادات ۹۲
منابع ۹۳
پیوست ۹۸

مقدمه

مقدمه

روند رو به رشد استفاده از مس به عنوان سومین فلز پر مصرف دنیا بعد از فولاد و آلومینیوم، باعث بالا رفتن قیمت آن در سطح دنیا و به دنبال آن افزایش فعالیت های اکتشافی شده است. این افزایش قیمت همچنین باعث پایین آمدن عیار حد و بالا رفتن نسبت باطله برداری سر به سری شده و در نتیجه امکان پیشروی به اعماق بیشتر را فراهم نموده است. بطوریکه ملاحظه می شود قیمت محصول نهایی به عنوان فاکتوری که با گذشت زمان تغییر می کند، طراحی و برنامه ریزی معادن را تحت تأثیر قرار می دهد. هرچند طراحی و برنامه ریزی برای معادن مفاهیمی پویا هستند که می بایست هر چند سال یکبار مورد بازبینی مجدد قرار بگیرند، اما مزیت پیش بینی صحیح یا نزدیک به واقعیت تغییرات آتی در عوامل طراحی، به منظور به حداقل رساندن خطاهای احتمالی به هنگام باز بینی مجدد بر کسی پوشیده نیست. از میان این فاکتور ها، قیمت محصول نهایی مشکل ترین فاکتوری است که باید تخمین زده شود. این مشکل از آنجا ناشی می شود که درآمدهای معدنکاری معطوف به آینده اند و پیش بینی قیمت برای آینده همواره با درصدی از خطا همراه خواهد بود.

روش های متعددی برای پیش بینی قیمت ها وجود دارند که از آن جمله می توان به روش های تحلیل رگرسیونی همچون روش ترند و روش تحلیل سری های زمانی اشاره کرد. در روش ترند تنها بر مبنای اینکه قیمت ها طی سالیان گذشته روندی صعودی یا نزولی داشته اند پیش بینی انجام می گیرد. الگوی توضیحی در سری های زمانی، بیانگر تنوع رفتاری بیشتری از سری قیمت ها است و بر اساس همین جریان رفتاری، قیمت های آینده را پیش بینی می کند. اما این روش تنها ساختار دینامیک تصادفی قیمت ها را بیان می کند. در صورت وجود یک روند زمانی در سری داده ها می توان با ترکیب آن با مدل های تصادفی سری های زمانی، رفتار قیمت ها را به نحو مطلوب تری تشریح کرد. اما مطابق تئوری آشوب، رفتار تصادفی یک سیستم دینامیکی ممکن است ظاهراً تصادفی به نظر برسد و در حقیقت از فرآیندی غیرخطی و معین تبعیت کند. در صورت وجود یک چنین ساختاری در سری روزانهٔ قیمت های مس، می توان یک رابطهٔ تابعی مشخص بصورت $p_t = f(p_{t-1})$ بین مقادیر گذشته و آیندهٔ قیمت ها جستجو کرد که $f(.)$ یک تابع معین و غیرخطی است. در جستجو برای پاسخ به این سوال که آیا قیمت های به ظاهر تصادفی، واقعاً تصادفی اند یا قطعی و معین، پیش بینی پذیری سیستم نیز مشخص می شود. اگر مشخص شود که قیمت ها کاملاً تصادفی اند، آنگاه رفتار آنها به هیچ وجه قابل پیش بینی نخواهد بود. در حالیکه اگر داده ها آشوبناک باشند، می توان رفتار آنها را برای دوره های کوتاه مدت پیش بینی کرد. پیش بینی بلند مدت بدلیل ناپایداری سیستم های آشوبناک میسر نیست.

تئوری آشوب برای اولین بار توسط *ادوارد لورنز*[1] *(۱۹۶۳)* معرفی شد و سپس در زمینه های مختلفی همچون فیزیک، اقتصاد، زیست شناسی، مطالعات اجتماعی و غیره مورد استفاده گرفت. بررسی آشوب در سری های زمانی مالی اصولاً با هدف پیش بینی صورت می گیرد. هرچند تحلیل سری های زمانی آشوبناک به دلیل کمبود روش های قطعی هنوز بیشتر نوعی هنر تلقی می شود تا علم، اما تاکنون تعداد زیادی از محققین به جستجوی آشوب در سری های مالی پرداخته اند و تست های متعددی نیز در این خصوص ارائه شده است. *Frank* و *Stengos* [۱]، *Hsieh* [۲] وجود ساختار آشوبناک در سری های زمانی اقتصادی مورد مطالعه شان را به اثبات رسانده اند. همچنین *Panas* و *Ninni* [۳] با بررسی سری زمانی قیمت محصولات نفتی و نیز *Scarlat* و همکاران [٤] در مورد نرخ ارز در بازار رومانی ، به وجود ساختار آشوبناک در این سری ها رسیده اند. در موارد بسیاری نیز با انجام تست های آشوب، هیچگونه دلیلی بر وجود چنین ساختاری دیده نشده است. به عنوان مثال *Cecen* و *Erkal* [۵] در بررسی نرخ ارز چند کشور مختلف در بازار امریکا وجود ساختار غیر خطی را در سری داده ها به اثبات رسانده اند اما معتقدند که این ساختار غیر خطی ، قطعی و معین نیست بلکه یک ساختار غیر خطی تصادفی است. در مواردی از این دست می توان به *Frank* و همکاران [٦] ، *Frank* و *Stengos* [۷] ، *Gilmore* [۹,۸] ، *Adrangi* و همکاران [۱۰]، *Yousefpoor* و همکاران [۱۱] اشاره کرد.

تحلیل سری های زمانی در زمینه های مختلف علمی نیز از دیر باز مورد توجه محققین بوده است. ساده ترین مدل سری زمانی یعنی مدل اتورگرسیو یا *AR(p)* (که *p* نشان دهندهٔ مرتبهٔ مدل است) اولین بار توسط *Yule (۱۹۲۷)* ارائه شد. مدل های *MA(q)*[2]، *ARMA(p,q)*[3]، *ARIMA(p,d,q)*[4] و *ARFIMA*[5] از دیگر مدل های سری های زمانی هستند که بارها برای اهداف پیش بینی استفاده شده اند(*p*، *q* و *d* نشان دهندهٔ مرتبهٔ مدل هستند). برای نمونه، *Jin Xiu* [۱۲] از یک مدل *ARFIMA* برای پیش بینی شاخص *Hang Sheng* در کشور هنگ کنگ استفاده کرد اما به نتایج قابل قبولی دست نیافت. *Ediger* و همکاران [۱۳] از یک مدل *ARIMA* به صورت مقایسه ای با رگرسیون برای پیش بینی تولید منابع سوخت فسیلی در کشور ترکیه استفاده کردند که نتایج آنها رضایت بخش بود. مدل های *ARMA* نیز بارها برای تشریح سری های زمانی واقعی توسط محققین مختلف همچون *Fuller* [۱٤]، *Fung* و همکاران [۱۵]، *Cuaresma* و همکاران [۱٦] بکار رفته اند. مدل های *ARMA* خطی هستند اما کمتر پیش می آید که سری های زمانی در دنیای

[1] -*Edward Lorenz.*
[2] -*Moving average.*
[3] -*Autoregressive moving average.*
[4] -*Autiregressive integrated moving average.*
[5] -*Autoregressive fractional integrated moving average.*

واقعی بصورت ترکیبات خطی محض باشند. سری های زمانی غیر خطی به دو گروه تقسیم می شوند: مدل های با رفتار غیر خطی در میانگین و مدل های با رفتار غیر خطی در واریانس. اکثر محققین تنها یکی از این دو روش را مبنای کار خود قرار داده اند. مدل هایی که رفتار غیر خطی را در واریانس داده ها وارد می کنند به مدل های نوع *ARCH* [1] معروف اند که اولین بار توسط *Engle* [۱۷] ارائه شدند. مدل های تعمیم یافتهٔ *ARCH* مدل های*GARCH* [2] هستند که توسط *Bollerslev* [۱۸] پیشنهاد شدند. *Garcia* و همکاران [۱۹] و *Swinder* و همکاران [۲۰] از مدل ترکیبی *ARMA-GARCH* برای پیش بینی قیمت روزانهٔ برق استفاده کردند. *Hsieh* [۲۱,۲] از مدل *GARCH* برای مدل سازی تغییرپذیری واریانس[3] نرخ های ارز خارجی استفاده کرده است.

استفاده از روش معمول ترند[4] به منظور پیش بینی قیمت محصول نهایی به هنگام طراحی معادن، با وجود اینکه به خوبی روند کلی رو به رشد قیمت جهانی مس را نشان می دهد اما قادر به پیش بینی دقیق آنها نیست. آگاهی از جریان کلی رو به رشد قیمت مس تنها می تواند فراهم کننده یک زمینهٔ مساعد و امیدوار کننده جهت سرمایه گذاری های کلان در بخش اکتشافات و استخراج معادن بزرگ مس باشد که غالباً توسط دولت ها و با هدف اصلی سودآوری درکنار اهداف جانبی اشتغال زایی، سیاست های وابستگی زدایی و غیره انجام می گیرد. روش ترند در برابر نوسانات قیمت ها عاجز است و نمی توان از آن در تعیین استراتژی ها و برنامه ریزی های کوتاه مدت که می بایست هماهنگ با نوسانات بازار تنظیم شوند استفاده کرد. شناخت تغییرات قیمت مس برای معادن با طول عمر کوتاه نیز از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. چراکه در صورت این شناخت می توان اوج بهره برداری از این معادن را منطبق با سالهایی تنظیم کرد که پیش بینی می شود قیمت ها افزایش قابل توجهی داشته باشند. پیش بینی دقیق یا نزدیک به واقعیت قیمت ها برای اهداف یاد شده، در صورت وجود یک ساختار قطعی در سری قیمت ها امکان پذیر خواهد بود. در این پروژه با بکار گیری تئوری آشوب به جستجوی چنین ساختاری در سری روزانهٔ قیمت مس پرداخته خواهد شد. برای این منظور ابتدا مدل سری زمانی قیمت ها ایجاد می شود تا در مواردی که لازم است با دور کردن روابط تصادفی موجود در سری داده ها، تست های تشخیصی آشوب انجام شوند. تست های متعددی در زمینه آشوب وجود دارند که در اینجا از تست های مرسوم *BDS*[5] ، توان لیاپونوف[6] ، بعد همبستگی[7] و یک تست جدید به نام بازگشت های نزدیک [8] استفاده می شود. در ادامه در فصل اول تئوری آشوب و تست های

---

[1] - Autoregressive conditional heteroskedasticity.
[2] - Generalized ARCH type.
[3] - Heteroscedasticity.
[4] - Time Trend Method.
[5] - Brock, Dechert, Scheinkman (1987).
[6] - Lyapunov exponent.
[7] - Correlation dimension.
[8] - Close returns.

مربوط به آن معرفی و نتایج حاصل ارائه می شوند. در فصل دوم به پیش بینی قیمت مس برای ۱۰ سال آینده پرداخته می شود. با معرفی معدن مس سونگون در فصل سوم، در فصل چهارم مدل بلوک اقتصادی معدن مس سونگون با استفاده از نرم افزار *NPV scheduler* بر اساس قیمت پیش بینی شده و دیگر پارامتر های اقتصادی ایجاد و سپس برنامه ریزی تولید معدن انجام می شود. فصل آخر به ارائهٔ نتایج و پیشنهادات اختصاص یافته است.

فصل اول

تئوری آشوب

۱-۱- آشوب[1]

واژهٔ *Chaos* در لغت به معنی درهم ریختگی، آشفتگی و بی نظمی است. معمولاً درمحاورات روزمره آشوب وآشفتگی نشانه بی نظمی و سازمان نیافتگی در نظر گرفته می شود و جنبه منفی دربر دارد. اما در واقع با پیدایش نگرش جدید و روشن شدن ابعاد علمی و نظری آن امروزه دیگر تئوری آشوب به مفهوم سازمان نیافتگی ، ناکارائی و درهم ریختگی تلقی نمی شود؛ بلکه آشوب فرآیندی غیر خطی و معین با رفتاری به ظاهر تصادفی است اما از سیستم های تصادفی تبعیت نمی کند. بر اساس تئوری آشوب ، وقایع پیچیده و پویای دنیا که بی نظم به نظر می رسند در بطن خود دارای یکسری الگو می باشند. الگوی پنهان تئوری آشوب را جاذب های پنهان می نامند که رفتار پویای یک مدل غیر خطی را در قالب یک نظم معین نشان می دهد.

درحالی که رفتارهای تصادفی به هیچ وجه قابل پیش بینی نیستند، رفتار سیستم های آشوبناک که اصطلاحاً از بعد پایینی برخوردارند را می توان برای دوره های زمانی کوتاه مدت پیش بینی کرد. بنابراین برای تعیین میزان پیش بینی پذیری قیمت مس، تشخیص آشوب از فرآیندهای تصادفی موجود در سری قیمت ها ضروریست. برای بررسی آشوب در بازار مس، تعداد ۲۷۳۵ قیمت روزانهٔ مس از طریق بورس فلزات لندن[2] جمع آوری شد. همانطور که در ادامه توضیح داده خواهد شد، به دلیل نیاز به داده های با طول زیاد، امکان بررسی آشوب در سری ها ماهانه و سالانه وجود ندارد.

[1] -*Chaos*
[2] -*London Metal Exchange (LME)*

۱-۲- تعریف ریاضی آشوب[1]

به منظور تعریف ریاضی آشوب، از مفاهیم سیستم دینامیک و تحلیل سری های زمانی استفاده شده است. سیستم های دینامیک شاخه ای از ریاضیات را تشکیل می دهند که در پی تشریح فرآیند های متحرک اند. معمولاً مشاهدات چنین فرآیندهایی در طول زمان تغییر می کنند و بنابراین می توان از تحلیل سری های زمانی برای بررسی آنها استفاده کرد. محققین مایل اند بدانند آیا نگاشتی مانند $x_t = f(x_{t-1})$ در سری داده ها وجود دارد یا خیر. اگر کسی بتواند چنین نگاشتی را بیابد، آنگاه می تواند بر اساس مقادیر اولیه، رشته ای از تکرار ها را تولید و به عبارت دیگر می تواند آینده را پیش بینی کند.

در روش سیستم دینامیکی رشته های $(x_0, x_1, \ldots, x_{n-1}, x_n, \ldots)$ حاصل از تکرار نگاشت $f(.)$ را یک اربیت از x_0 تحت نگاشت $f(.)$ می نامیم. نگاشت $f^n(.)$ را nاُمین تکرار نگاشت $f(.)$ می نامیم که با n بار استفاده از تابع $f(.)$ بدست می آید. هنگامیکه نقاط یک اربیت بعد از nبار تکرار نگاشت خودشان را تکرار می کنند، آن اربیت را پریودیک می خوانند. بنابراین یک رشته از تکرارهای نگاشت بصورت ترکیبی از nعنصر ابتدایی است که بطور نامحدودی تکرار می شود.

تعریف آشوب که توسط *Devany* در سال *۱۹۸۹* ارائه شده است احتمالاً معمول ترین تعریفی است که بر اساس سه ویژگی زیر بیان می شود.

تعریف (۱). فرض کنید V یک فاصلهٔ زمانی باشد. نگاشت $f: V \to V$ در V آشوبناک فرض می شود، اگر:

۱- حساسیت به شرایط ابتدایی داشته باشد.

۲- تراگذار[2] باشد.

۳- نقاط پریودیک در V متراکم و چگال باشند.

واگرایی سریع جواب ها که در ابتدا به یکدیگر نزدیک اند، وابستگی حساس به شرایط اولیه یا وابستگی حساس و یا بصورت ساده تر حساسیت خوانده می شود. اگر این حساسیت در یک سیستم دینامیک وجود داشته باشد، آنگاه پیش بینی های بلند مدت را غیر ممکن می سازد و بنابراین به عنوان یکی از ویژگی های کلیدی رفتار آشوبناک مد نظر قرار می گیرد. از زبان ریاضیاتی حساسیت را می توان با تعریف زیر تشریح کرد.

---

[1]- *Mathematical definition of Chaos*

[2] -*Transitive.*

تعریف (۲). یک نگاشت بصورت $f:[0,1]\to[0,1]$ وابستگی حساس به x دارد اگر شرط زیر برای یک $\delta>0$ برقرار باشد :

برای هر فاصلهٔ باز I در [۰،۱] که شامل x باشد، یک $y\in I$ و یک $n\in N$ وجود دارد طوریکه :

$$\left|f^n(x)-f^n(y)\right|\geq\delta \qquad (۱-۱)$$

عدد δ را ثابت حساسیت در x برای نگاشت می خوانند. نگاشت $f:[0,1]\to[0,1]$ را هرجا که تعریف در هر $x\in[0,1]$ صحیح باشد، تابع حساس می خوانند.

تعریف (۳). نگاشت $f:[0,1]\to[0,1]$ را تراگذار گوییم اگر برای هر جفت زیرفاصلهٔ I و J از [۰،۱] یک n وجود داشته باشد طوریکه $f^n(I)\bigcap J\neq\phi$ باشد. مستقیماً نتیجه گیری می شود که اربیت فاصلهٔ I_0 در فاصلهٔ [۰،۱] متراکم یا چگال است. مجموعهٔ I_0 را در فاصلهٔ [۰،۱] متراکم گوییم اگر برای هر فاصلهٔ $I\subseteq[0,1]$ نقطه ای در I_0 وجود داشته باشد که در I نیز باشد.

به نظر می رسد اربیت های پریودیک با رفتار آشوبناک در تضاد اند. اما این نقاط پریودیک همگی ناپایدار هستند و این بدان معنی است که به محض نزدیک شدن یک اربیت به یک نقطهٔ پریودیک، به مکانی دیگر از فضای حالت دفع می شود. بنابراین در عمل، یک مجموعهٔ چگال از اربیت های پریودیک فاقد یک رفتار منظم هستند[۲۲].

۱-۳- باز سازی فضای حالت[1]

فضای حالت به صورت یک فضای m بعدی تعریف می شود که محور های آن، متغیرهای توضیحی یا همان متغیر های حالت سیستم دینامیک هستند. به عبارت دیگر فضای حالت تعداد شرایط اولیه ای است که می بایست تعیین شوند. از طرفی بی نظیر و شور انگیز ترین ویژگی آشوب در این است که اصولاً هیچ اهمیتی ندارد که محقق از چه متغیری استفاده می کند. چون اکثر ویژگی های دینامیکی در تک تک متغیرها و تأخیرات آنها وجود دارد. در عمل تنها چیزی که از رفتار سیستم داریم یک سری اسکالر یا تک بعدی از مشاهدات (قیمت ها) است. فرآیند کنترل کنندهٔ سیستم یا نگاشت $f(.)$ را در اختیار نداریم. باز سازی فضای حالت، زیربنای بازیابی ویژگی های جاذب سیستم مولد سری زمانی اسکالر مشاهده شده است. بعلاوه باز سازی کل فضای حالت توسط متغیر اندازه گیری شده نه ضرورتی

[1] - *Reconstruction of State Space*

دارد و نه مورد توجه است چراکه بعد جاذب (بعدی از فضا که توسط جواب پر می شود و اغلب عددی غیر صحیح است) اغلب کوچکتر از بعد این فضا خواهد بود. ساختن یک فضای جدید که بتوان جاذب معادل را در آن جا سازی یا تعبیه کرد کفایت می کند. فضای جدید باید این ویژگی ها را داشته باشد که هر نقطهٔ آن توسط روابط دینامیکی منحصر به فرد به نقطهٔ بعدی برسد و یک تبدیل ملایم بین این فضای جدید و فضای اصلی وجود داشته باشد. *Taken* ثابت کرد متغیرهایی که به آنها تأخیر زمانی داده می شود، به شرط آنکه با همهٔ متغیر های دیگر در ارتباط باشند، یک فضای تعبیه شدهٔ مناسب را ایجاد می کنند. البته تعداد تأخیرات زمانی نیز می بایست حداقل برابر $2D+1$ باشد که D بعد سیستم مولد است [۲۳].

در مورد تأخیرات زمانی باید گفت که اگر یک سیستم قطعی باشد، می توان انتظار داشت که هر کدام از مقادیر سری زمانی به تعداد معدودی از مقادیر قبلی وابسته، یعنی بصورت $X_{n+1} = g(X_n, X_{n-1}, X_{n-2}, \ldots)$ باشد. چراکه این مقادیر ثبت شدهٔ نزدیک به هم به عنوان یک توالی از مشتقات زمانی، اساساً اطلاعات مشابهی را شامل شوند.

فضای حالت باز سازی شدهٔ توسط تأخیرات زمانی، فضای بدست آمده از رسم نمودار تک تک مقادیر سری زمانی در برابر تعدادی از مقادیر گذشته می باشد. بعد این فضا را می توان بطور دلخواه بر اساس تمام N دادهٔ موجود در سری زمانی، انتخاب کرد که در اینصورت مجموعهٔ تمام داده ها را می توان بصورت یک نقطه در فضای N بعدی نشان داد. نکتهٔ دیگر اینکه فضای باز سازی شده توسط تأخیرات زمانی باید با انتخاب حداقل بعد، صورت گیرد که به واسطهٔ آن خواص دینامیکی مهم حفظ می شوند[۲٤].

بنابراین طبق قضیهٔ *Taken*، سری $\{x_t\}$ را می توان به M تایی های $x_t^M = (x_t, x_{t+\tau}, \ldots, x_{t+(m-1)\tau})$ تبدیل کرد. که τ پارامتر تأخیر زمانی می باشد. هر M تایی بیانگر یک نقطه در یک فضای اقلیدسی M بعدی می باشد. این تبدیل سری زمانی به فضای M بعدی را یک تعبیه یا جایگزینی[1] M بعدی داده ها می گویند[۲۳].

این M تایی ها را می توان رسم کرد و ویژگی های مجموعه نقاط حاصله را مطالعه کرد. اگر سری زمانی حاصل از یک فرآیند تصادفی باشد، آنگاه با افزایش بعد جایگزینی، M تایی ها تمام فضا را در همهٔ جهات پر می کنند و فرآیند از بعد نا متناهی خواهد بود. اما اگر سری زمانی توسط یک مدل قطعی (معین) ایجاد شود، مسیر سری زمانی در فضا به یک زیرمجموعه از نقاط جذب می شود. همانطور که

[1] *-Embedding.*

پیش تر نیز اشاره شد، این نقاط را به اسم جاذب می شناسند. در این حالت هنگامیکه بعد جایگزین M افزایش می یابد، بعد نقاط از یک حد خاصی (مثلاً k) تجاوز نمی کند و کمتر از M خواهد بود.

۱-٤- آزمون های تشخیص آشوب[1]

حساسیت به شرایط اولیه یکی از ویژگی های مهم رفتار آشوبناک است. این ویژگی بدان معنی است که کوچکترین تغییر در شرایط اولیهٔ سیستم منجر به ایجاد یک مسیر زمانی کاملاً متفاوت با مسیر زمانی قبلی خواهد شد. این همان چیزی است که در ادبیات آشوب از آن به اثر پروانه ای[2] یاد می شود. علی رغم این که تنها این ویژگی توسط بعضی از محققین برای تشخیص آشوب استفاده شده است اما وجود چنین خاصیتی نمی تواند لزوماً دلیل بر آشوبناک بودن یک سیستم باشد. همانطور که در تعریف ریاضی آشوب عنوان شد این خاصیت تنها یکی از شرایط آشوبناک بودن یک سری زمانی است. برای آشوبناک بودن سری داده ها می بایست تمام پیش شرط های بیان شده در تعریف ریاضی آشوب تأمین شوند تا یک سری زمانی آشوبناک باشد. بنابراین تعریف ریاضی آشوب، می تواند یک قالب مفید برای انتخاب سیستماتیک تست های آشوب ارائه کند[۲۵].

برای بررسی آشوب در سری داده ها، تست هایی همچون توان لیاپونوف، بعد همبستگی، بازگشت های نزدیک، *BDS* و غیره ارائه شده اند. شایان ذکر است که بعضی از این تست ها لزوماً تست های مربوط به آشوب نیستند و تنها در شناخت ویژگی های مهمی نظیر وابستگی غیر خطی در داده ها می توانند مفید باشند. در ادامه ضمن معرفی تست های فوق و خاصیتی که هر کدام از آنها جستجو می کنند، از آنها برای بررسی وجود آشوب در سری روزانهٔ قیمت مس استفاده و نتایج حاصل ارائه می شوند.

۱-٤-۱- آزمون توان لیاپونوف[3]

بطوریکه عنوان شد منظور از جاذب، بخشی از فضای حالت است که مسیر زمانی به آن ختم می شود. به عنوان مثال فضای حالت مربوط به یک آونگ بوسیلهٔ موقعیت و سرعت اولیهٔ آن تعیین می شود (سرعت و موقعیت، بردارهای حالت سیستم هستند). حرکت این آونگ در شرایط وجود اصطکاک، حرکتی میرا است و پس از چندی در نقطهٔ تعادل از حرکت باز می ایستد و به پایداری می رسد. پس در شرایط وجود اصطکاک، مسیر زمانی به صورت مارپیچی به سمت یک نقطهٔ پایدار حرکت می کند و یک

[1] *-Chaos Diagnostic Tests*
[2] *-Butterfly effect.*
[3] *- Lyapunov Exponent Test*