

## تخمین توابع اثر شلاقی و ذخیره موجودی با استفاده از روش شناسی سطحی پاسخ

دکتر مقصود امیری\*

دکتر لعیا الفت\*\*

امیر حسن زاده\*\*\*

### چکیده

یکی از دلایل ناکارآمدی زنجیره‌های تأمین «اثر شلاقی» است. این پدیده بر افزایش نوسانات تقاضا به سمت بالای زنجیره اشاره دارد. مدیران زنجیره، تأمین این افزایش نوسانات را در سطوح موجودی و سفارشات تجربه می‌کنند. از طرفی، کاهش نوسان در سفارشات ممکن است به علت افزایش در واریانس موجودی، اثر منفی بر سطح خدمت به مشتری داشته باشد. بنابراین، در این نوشتار قصد داریم در یک زنجیره تأمین سه سطحی شامل یک خرده فروش، یک عمده فروش و یک تولیدکننده با ۲ حالت متمرکز و غیرمتمرکز، با توجه به دلایل اثر شلاقی به تخمین توابع اثر شلاقی و ذخیره موجودی با استفاده از روش شناسی سطح پاسخ بپردازیم، و نشان دهیم که با توجه به اهمیت زیاد دلایل اثر شلاقی و تعاملات بین آن‌ها می‌توان درصدهای بهینه دلایل و تعاملات بین آن‌ها و میزان مطلوبیت اثر شلاقی و ذخیره موجودی را در غالب یک مدل ارائه نمود.

واژگان کلیدی: اثر شلاقی، ذخیره موجودی، سفارش تا حد معین، طراحی، روش شناسی سطح پاسخ.

---

\* دانشیار دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبایی

\*\* دانشیار دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبایی

\*\*\* دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) rimahassanzadeh@yahoo.com

## مقدمه

شواهد واقعی زیادی وجود دارد که بسیاری از شرکت‌ها هزینه‌های زیادی را در زنجیره‌های تأمین خود متحمل می‌شوند. گاهی اوقات، این شرکت‌ها در زمانی که مشتریان به فروشگاه‌ها مراجعه می‌کنند با افت شدیدی در تقاضای محصولات و یا کمبود موجودی مواجه می‌شوند [۱]. علاوه بر این، با وجود موجودی‌های زیاد در کنار قفسه‌های خالی، سطح بالای خدمت‌رسانی به مشتری تضمین نمی‌شود. بنابراین، مدیران موجودی در زمان تجدید موجودی باید به دو فاکتور اولیه توجه داشته باشند و آن، این است که قانون تجدید موجودی بر تغییرپذیری سفارش (یعنی اثر شلاقی؛ نسبت واریانس سفارشات به واریانس تقاضا) و بر واریانس ذخیره موجودی (یعنی تقویت ذخیره موجودی؛ نسبت واریانس موجودی به واریانس تقاضا) نیز اثر گذار است. این موضوع یک تبادلی است که هر زنجیره با آن درگیر است. در حقیقت، اثر شلاقی هزینه‌ها را به سوی سطوح بالادستی (مانند تولیدکننده و تأمین‌کننده) هدایت می‌کند، درحالی‌که سطوح پایین‌دست (مانند خرده‌فروش) ممکن است در این مورد نگرانی نداشته باشد. از طرفی کاهش اثر شلاقی ممکن است، اثری منفی بر سطح خدمت‌دهی به مشتری داشته باشد [۲]. در این راستا با استفاده از سیاست تعمیم‌یافته  $(s, S)$  که توسط هر کدام از سطوح زنجیره استفاده می‌شود، به بررسی اثر شلاقی و ذخیره موجودی می‌پردازیم. در این سیاست سفارش‌دهی، پارامترهایی درگیر هستند که در حکم دلایل اثر شلاقی مطرح شده‌است و با استفاده از رویکردی به نام روش شناسی سطح پاسخ<sup>۱</sup> می‌توان همزمان اثرات این دلایل را بر مقدار اثر شلاقی و ذخیره موجودی بررسی و مقدار بهینه این عوامل را تنظیم نمود. در این نوشتار، در بخش ۲، به مرور پیشینه و ادبیات تحقیق، در بخش ۳، به تعریف مسئله، و در بخش ۴، به مدل‌سازی آن خواهیم پرداخت. در بخش ۵، نیز الگوریتم پیشنهادی را معرفی خواهیم کرد و در نهایت در بخش ۶، نتایج حاصل از این الگوریتم در دو حالت مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

## مرور ادبیات

"فارستر" در سال ۱۹۶۱ از اولین محققانی بود که به این پدیده اشاره نمود و آن را

«تقویت تقاضا» نامید [۳]. "پراکتر" و "کمبل" برای توضیح رفتار مشاهده شده بین مشتریان و تأمین کنندگان این پدیده را «اثر شلاقی» نامید [۴]. "لی" و همکاران [۵ و ۶] این پدیده را به صورت افزایش تغییرپذیری سفارش، زمانی که سفارشات به سوی بالای جریان زنجیره تأمین در حرکت است تعریف می کند. به طوری که الگوهای تقاضای مشتریان به الگوهای تولید بسیار نامنظم برای تأمین کننده مبدل می شود. آن ها، پنج دلیل اصلی اثر شلاقی را شناسایی کردند که عبارتند از: بروز رسانی علائم تقاضا، مهلت تحویل، دسته بندی سفارش، بازی های کمبود و جیره بندی، نوسان قیمت. شواهد زیادی بر وجود این پدیده در صنعت وجود دارد. به عنوان مثال، مستندات زنجیره تأمین یک قنادی نشان می دهد که واریانس سفارشات در محصولات بزرگ مقیاس ۹ به ۱ و محصولات کم مقیاس ۲۸ به ۱ افزایش یافته است [۷]. در راستای کمی کردن اثر شلاقی دو روش متداول، نگرش مهندسی کنترل و نگرش آماری وجود دارد. استفاده از مهندسی کنترل برای تولید و کنترل موجودی اولین بار توسط "سایمون" در سال ۱۹۵۲ با تبدیل «لاپلاس» استفاده شد [۱۰] این اقدام سریعاً توسط انجمن (OR) مورد توجه قرار گرفت و بسیاری از نویسندگان از این تکنیک استفاده کردند. این متدولوژی رفتارهای پویای قوانین بازپرسازی را به تصویر می کشد. "لی" و همکاران [۵ و ۶] و "چن" و همکاران [۸ و ۹] از نگرش آماری برای کمی کردن اثر شلاقی استفاده نموده اند. آن ها، بزرگنمایی تقویت واریانس را در زنجیره تأمین برای انواعی از فرایندهای تقاضا کمی کردند و اثر شلاقی را به صورت کران پایین تعریف نمودند. در ادامه کار آن ها، "سیه" و همکاران [۱۱] با استفاده از یک تکنیک آماری ناپارامتریک توانستند اثر شلاقی را در فاصله اطمینان ۹۵٪ تخمین بزنند. بر مبنای کار "چن" و همکاران، "ساک" [۱۲] اثر شلاقی را در غالب شبکه های زنجیره تأمین مطرح کرد و نشان می دهد که وجود عاملی مانند تقسیم مخاطره<sup>۴</sup> مقدار اثر شلاقی را بسیار زیاد می کند.

## بیان مسئله

بیشتر مقاله هایی که مورد بررسی قرار گرفته است، به بررسی دلایلی ایجاد اثر شلاقی، و یا اندازه گیری آن بر مبنای یک یا دو علت می پردازند. اما کمتر به

1- Bullwhip Effect  
2- Hsieh et al  
3- Sucky  
4- Risk Pooling

اندازه گیری اثر شلاقی بر مبنای دلایل شناخته شده و تعیین سهم نسبی هر کدام از دلایل بر مقدار اثر شلاقی پرداخته شده است. از این رو، در این نوشتار قصد داریم چهار دلیل اصلی اشاره شده اثر شلاقی را هم زمان در یک زنجیره عرضه سه سطحی (یک خرده فروش، یک عمده فروش و یک تولید کننده) با فرایند تقاضای تصادفی توزیع نرمال و با استفاده از طراحی آزمایشات مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و برای به دست آوردن اطلاعات، به صورت سیستماتیک سطوح هر فاکتور (دلیل) را تغییر و ترکیبات مختلف فاکتورهای دیگر را به طور هم زمان مورد بررسی قرار می دهیم. این رویه به ما اجازه می دهد که اثرات اصلی و تعاملی فاکتورهای مختلف را دریابیم. در این راستا از پرکاربردترین رویه تجدید موجودی، یعنی سیاست سفارش تا حد معین<sup>۱</sup> استفاده می شود [۱۳ و ۱۴]. این سیاست به علت پیش بینی تقاضا یا حتی در حالت به اشتراک گذاشتن اطلاعات تقاضا همیشه منجر به ایجاد اثر شلاقی می شود. برای جلوگیری از این مشکل، شکل تعمیم یافته این سیاست توسعه یافته است [۱۵].

### مدل سازی مسأله

برای مدل سازی مسأله، پس از تعریف پارامترهای مسأله، قانون تجدید موجودی و روش شناسی سطح پاسخ ارائه شده و سپس با انتخاب عوامل و تعیین سطوح و متغیر پاسخ آن ها به انجام آزمایش با توجه به دو حالت زنجیره متمرکز و غیرمتمرکز پرداخته می شود.

#### پارامترها و متغیرهای مدل

- $S_t$ : سطح موجودی هدف در دوره  $t$ ؛
- $\bar{D}^{T_p+R}$ : برآوردی از میانگین تقاضا در دوره  $T_p + R$ ؛
- $\sigma^{T_p+R}$ : برآوردی از انحراف استاندارد خطای پیش بینی در طول دوره های  $T_p + R$ ؛
- $k$ : پارامتری ثابت برای معرفی سطح مطلوبی از خدمات؛
- $O_t$ : مقدار سفارش در دوره  $t$ ؛
- $R$ : دوره بازنگری وضعیت موجودی؛

$TNS$ : موجودی هدف یا سطح مبنا؛

$T_p \cdot \bar{D} = TWIP$ : موجودی در جریان هدف؛

$\gamma$  و  $\beta$ : کنترلگرهای مهندسی برای هموار کردن سفارشات؛

$O'_t$ : مقدار سفارش نباید منفی باشد.

### قانون تجدید موجودی

انواع متفاوتی از سیاست‌های تجدید موجودی وجود دارد [۱۳ و ۱۴] که در این نوشتار از سیاست‌های  $(s, S)$  استفاده می‌کنیم. در این سیاست، وضعیت موجودی پیگیری (= مقدار در دست + موجودی در راه - کمبود) و در هر دوره (روزانه، هفتگی) بازبینی می‌شود و سفارشی برای رساندن وضعیت موجودی به یک سطح معین یا سطح مبنا ایجاد می‌شود که تعیین‌کننده مقادیر سفارش است. به عبارتی دیگر:

$$S_t = \bar{D}^{T_p+R} + k \cdot \sigma^{T_p+R} \quad (1)$$

"دجونگ هیر" و همکاران [۱۶] نشان داد که سیاست  $(s, S)$  با پیش‌بینی نمو هموار یا میانگین متحرک برای هر فرایند تقاضا همیشه منجر به اثر شلاقی خواهد شد. بنابراین، زمانی که فرایند تقاضا به صورت تصادفی باشد، بهترین پیش‌بینی ممکن در هر دوره، میانگین تقاضاهای دوره قبلی است ( $\bar{D}_t = \bar{D} = \mu_D$ ). برای سادگی کار قسمت ذخیره اطمینان در رابطه (۱) را با  $TNS$  جایگزین می‌کنیم. اکنون با توجه به قانون هموارسازی، مقدار سفارش عبارتست از:

$$O_t = S_t - \text{وضعیت موجودی} \quad (2)$$

وضعیت موجودی برابر است با موجودی خالص ( $NS$ ) به علاوه موجودی در جریان سفارش و موجودی خالص برابر است با موجودی در دست منهای کمبودها.

$$O_t = \overbrace{\bar{D}(T_p + R)}^S + TNS - \overbrace{(NS_t + WIP_t)}^{\text{وضعیت موجودی}} \Rightarrow \quad (3)$$

$$= R \underbrace{\bar{D}}_{\text{جزء پیش‌بینی}} + \underbrace{(TNS - NS_t)}_{\text{تفاوت در موجودی}} + \underbrace{(T_p \cdot \bar{D} - WIP_t)}_{\text{تفاوت در موجودی در راه}}$$

رابطه (۳) همانند رابطه (۲) است، با این تفاوت که رابطه اصلی را به ۳ جزء تفکیک کرده ایم: جزء پیش‌بینی تقاضا، جزء تفاوت در موجودی و جزء تفاوت در موجودی در جریان (WIP). حال اگر بخواهیم الگوی بازپرسازی هموار را ایجاد کنیم، می‌توانیم ۲ جزء تفاوت را در رابطه (۳) به صورت زیر موزون کنیم:

$$\begin{cases} O_t = R\bar{D} + \beta(TNS - NS_t) + \gamma(TWIP - WIP_t) \\ O'_t = \text{MAX}(0, O_t) \end{cases} \quad (4)$$

### روش‌شناسی سطح پاسخ

هنگامی که عوامل و روابط زیادی روی متغیر پاسخ تأثیر داشته باشند، روش‌شناسی سطحی پاسخ (RSM) یکی از ابزارهای مؤثری است که با کمترین منابع و داده‌های کمی، و با طرح آزمایشی مناسب همزمان چندین متغیر را تعیین می‌کند. مزیت اصلی (RSM) کاهش تعداد تکرارهای آزمایشات برای ارزیابی چندگانه و روابط متقابل آن‌هاست. به‌طور کلی، رویه (RSM) شامل قدم‌های ذیل می‌باشد [۱۷].

گام ۱. طراحی و انجام آزمایشاتی جهت دستیابی به معیارهای کافی و قابل اطمینان پاسخ مورد نظر؛

گام ۲. ایجاد مدل‌های ریاضی سطح پاسخ مرتبه اول و دوم با بهترین برازش؛

گام ۳. یافتن مجموعه بهینه‌ای از پارامترهایی که حداکثر یا حداقل مقدار پاسخ را تولید کند؛

گام ۴. بررسی اثرات مستقیم و تعاملی پارامترهای فرایند از طریق جدول تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA).

اگر همه متغیرها قابل اندازه‌گیری باشند، سطح پاسخ می‌تواند به صورت رابطه (۵) بیان شود:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

در این رابطه  $n$  تعداد متغیرهاست. هدف بهینه کردن متغیر پاسخ  $Y$  به گونه‌ای است که رابطه درستی بین متغیرهای مستقل و متغیر پاسخ برقرار شود.

## انتخاب عوامل و تعیین سطوح آنها

دلایل به‌روزرسانی پیش‌بینی تقاضا، دسته‌بندی سفارش، بازی‌های کمبود و جیره‌بندی، تأخیرهای اطلاعات و مواد، مطابق با جدول ۱ به‌عنوان متغیرهای مدل شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌است. و با تغییر ارزش این چهار متغیر، می‌توان شدت اثر هر کدام از دلایل را بر مقدار اثر شلاقی و ذخیره موجودی مورد بررسی قرار داد. با توجه به سیاست سفارش‌دهی تعمیم‌یافته رابطه (۴) مقدار سفارش به‌وسیله چندین متغیر تعیین می‌شود.

۱. ضریب اصلاحی ( $\beta$ ) مربوط به تفاوت موجودی هدف و واقعی، به‌عنوان درجه استفاده از این تفاوت در مقدار سفارش‌دهی محسوب می‌شود. از آنجائی که در پیش‌بینی تقاضا، مقدار موجودی به نحوی انتخاب می‌شود که تقاضاهای غیرمنتظره را در زمان انتظار پوشش دهد. بنابراین، این فاکتور می‌تواند به‌عنوان متغیر به‌روزرسانی پیش‌بینی تقاضا در نظر گرفته شده‌است.

۲. زمان‌بندی ایجاد سفارش ( $R$ ) در مدل شبیه‌سازی، انباشتن تقاضا قبل از ایجاد سفارش می‌باشد. به‌عبارتی دیگر، به‌جای ایجاد سفارش در هر زمان ممکن، شرکت‌ها اغلب از سفارش‌دهی دوره‌ای برای دسته‌ای از تقاضا استفاده می‌کنند. بنابراین، زمان سفارش‌دهی می‌تواند به‌عنوان متغیر دسته‌بندی سفارش در مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شود.

۳. در زنجیره تأمین زمانی که عرضه محصول با کمبود مواجه است، تولیدکننده اقدام به جیره‌بندی محصول می‌کند. که به تبع آن مشتریان به امید دست یافتن به مقدار مورد نیاز، نیازهای واقعی خود را بیش از اندازه نشان می‌دهند و مقدار بیشتری را سفارش می‌دهند. این موضوع مشابه وضعیتی است که در آن سفارش‌دهی بدون توجه به سفارشات که قبلاً صادر شده است، انجام می‌گیرد. ضریب اصلاحی سفارشات و کالاهای در راه ( $\gamma$ ) به‌عنوان یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در مقدار سفارشات محسوب می‌شود.

۴. در زنجیره تأمین معمولاً تأخیرهای زمانی از زمان سفارش تا زمان دریافت محصول وجود دارد ( $T_p$ ).

## انتخاب متغیر پاسخ

تاکنون، تمرکز بروی واریانس سفارشات (اثر شلاقی) بوده است، اما این فقط یک روی سکه است. در یک سیستم تولیدی هموار، موجودی به عنوان بافر عمل می کند و با تنظیم افزایش و یا کاهش در تقاضا، نرخ تولید را تاحدی ثابت نگه می دارد. و از این طریق می توان سطح خدمت رسانی به مشتری را تنظیم کرد. از طرفی اثر شلاقی چون تمایل دارد سطح موجودی را در سراسر زنجیره کاهش دهد، بنابراین اثر منفی بروی سطح خدمت به مشتری دارد. در نتیجه باید به گونه ای عمل کرد که هم اثر شلاقی کاهش یابد ( $y_1$ ) و هم سطح خدمت به مشتری از طریق کاهش در تغییرات موجودی ( $y_2$ ) افزایش یابد. از آنجایی که توزیع این دو متغیر پاسخ ذاتاً چوله به سمت است، بنابراین لگاریتم آن ها را در مبنای ۱۰ به عنوان متغیر پاسخ در نظر می گیریم.

## انتخاب طرح آزمایش

در این قسمت برای انجام آزمایش باید از یک طرح آزمایش استفاده نمود. برآزش و تحلیل سطح های پاسخ با انتخاب صحیح طرح آزمایشی بسیار ساده است. به جهت آنکه قصد داریم تخمین توابع یک زنجیره را در دو حالت انجام دهیم، هر کدام از حالت ها باید یک طرح عاملی برای انجام آزمایش داشته باشند.

حالت ۱: زنجیره تأمین با اطلاعات غیر متمرکز

هر یک از سطوح زنجیره، کاملاً به صورت مستقل از هم تصمیم گیری می کنند. بنابراین، هر سطح در ارسال سفارش از پارامترهای سفارش دهی جدول ۱ مختص به خود استفاده می کنند. در این حالت هر سطح در سفارش دهی با چهار عامل مواجه است، بنابراین طرح عاملی شامل ۲۵۶ نقطه ( $n_f = 2^8 = 256$ ) است. اما از آنجا که انجام این مقدار آزمایش وقتگیر می باشد، می توانیم از کسری از آن ( $n_f = 2^{(8-3)} = 32$ ) جهت تخمین استفاده کنیم.

حالت ۲: زنجیره تأمین با اطلاعات متمرکز

در این حالت اطلاعات تقاضا و پارامترهای اشاره شده در جدول ۱ در بین سطوح به اشتراک گذاشته می شود. در این حالت کل زنجیره با چهار عامل مواجه، بنابراین طرح



عاملی شامل ۱۶ نقطه ( $n_f = 2^4 = 16$ ) است.

جدول ۱. رابطه بین دلایل و متغیرها و سطوح آنها.

سطح ۲	سطح ۱	متغیرهای شبیه‌سازی (فاکتورها)	دلایل اثر شلاقی
۰/۹	۰/۱	ضریب اصلاحی تفاوت در موجودی ( $\beta$ )	به‌روز رسانی پیش‌بینی تقاضا
۳	۱	فاصله زمانی بین دسته‌های سفارش ( $R$ )	دسته‌بندی سفارشات
۰/۹	۰/۱	ضریب اصلاحی سفارشات و کالاهای در راه ( $\gamma$ )	بازی‌های کمبود و جیره‌بندی
۴	۲	تأخیر در اطلاعات و مواد ( $T_p$ )	تأخیر در اطلاعات و مواد

### طرح‌های مرکب مرکزی

در اکثر مسائل مربوط به (RSM)، برای برازش مدل از چندجمله‌ای‌ها استفاده می‌شود. اگر پاسخ به خوبی به وسیله یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل‌بندی شده باشد، آنگاه تابع تقریب‌کننده مدل، مدل مرتبه اول است. اگر در سیستم خمیدگی وجود داشته باشد، آنگاه باید از چندجمله‌ای‌های درجه بالاتر، مانند مدل مرتبه دوم رابطه (۶)، استفاده کرد [۱۸].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (6)$$

یکی از طرح‌های به‌کار رفته برای برازش مدل مرتبه دوم، طرح مرکب مرکزی است و عبارتست از عامل  $2^k$  یا کسری از آن (کدبندی‌شده با نماد معمول  $\pm 1$ ) با الحاق  $2k$  نقطه محوری  $(\pm a, 0, 0, \dots, 0)$ ،  $(0, \pm a, 0, \dots, 0)$  و ... و  $(0, 0, 0, \dots, \pm a)$  و  $n_c$  نقطه مرکزی  $(0, 0, 0, \dots, 0)$  است. طرح مرکب مرکزی با انتخاب مناسب  $\alpha$  دوران‌پذیر می‌شود. مقدار  $\alpha$  برای دوران‌پذیری به تعداد نقاط در بخش عاملی طرح بستگی دارد. درواقع با انتخاب  $\alpha = (n_f)^{1/4}$  معلوم می‌شود که طرح مرکب مرکزی دوران‌پذیر است، در این رابطه  $n_f$  تعداد نقاط استفاده‌شده در بخش عاملی طرح است. تعیین مقدار  $\alpha$  به مشخصات معین و مطلوب برای طرح و به تعداد عوامل مورد بحث بستگی دارد.

## انجام آزمایش

برای انجام آزمایش در حالت اول، خرده‌فروش با استفاده از میانگین تقاضای پیش‌بینی‌شده، سطح هدف موجودی را مطابق رابطه (۴) محاسبه و به عمده‌فروش سفارش می‌دهد. تقاضا مشاهده‌شده  $N(110, 35)$  از محل موجودی تأمین و مابقی به صورت سفارش پس‌افت در سیستم ذخیره می‌شود. سطح بعدی، یعنی عمده‌فروش با توجه به مقدار سفارش خرده‌فروش، تقاضا را پیش‌بینی کرده و برای تعیین سطح هدف موجودی از آن استفاده کرده و به تولیدکننده سفارش می‌دهد. تولیدکننده به جهت نامحدود بودن در ظرفیت هر مقدار سفارش را تأمین می‌کند. در حالت دوم، به علت آنکه زنجیره متمرکز است، اطلاعات مربوط به تقاضا، شیوه پیش‌بینی و خط‌مشی موجودی در بین تمام سطوح به اشتراک گذاشته می‌شود. در این حالت، خرده‌فروش سطح موجودی هدف را بر اساس میانگین تقاضای پیش‌بینی‌شده تعیین و به عمده‌فروش سفارش می‌دهد. عمده‌فروش این سفارش را همراه با میانگین تقاضای پیش‌بینی شده خرده‌فروش دریافت می‌کند. و به‌طور مشابه، سطح هدف موجودی خود را تعیین کرده و به کارخانه سفارش می‌دهد.

جدول ۲. نتایج اجرای طرح عاملی برای تخمین بهترین تابع در حالت اول.

$\beta$	$\gamma$	L	R	$\beta'$	$\gamma'$	L'	R'	$y_1$	$y_2$
-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۲/۰۲۱۳	۴/۲۱۰۶
۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۲/۸۵۲۸	۲/۷۲۰۶
-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۲/۹۰۴۶	۳/۲۷۵۴
۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۰/۸۱۷۱	۱/۲۶۲۸
-۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱/۰۲۳۴	۱/۵۴۵۱
۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۲/۹۰۲۸	۴/۵۷۳۵
-۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۳/۰۵۵۷	۴/۳۳۱۹
۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۰/۷۳۶۷	۱/۷۰۶۴
-۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۲/۸۴۶۴	۱/۴۹۵
۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۰/۴۷۶۷	۲/۴۹۵
-۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۰/۵۳۱۲	۲/۷۸۱۱
۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	۲/۶۷۱۵	۴/۰۷۰۰
-۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۱	۲/۸۳۳۵	۰/۵۹۶۸
۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۰/۴۴۳۷	۲/۴۶۷۰
-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۰/۴۳۰۰	۲/۳۹۷۴
۱	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	۲/۹۱۲۵۴	۳/۳۶۹۵

$\beta$	$\gamma$	L	R	$\beta'$	$\gamma'$	L'	R'	$y_1$	$y_2$
-۱	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۰/۹۳۹۳	-۰/۸۷۸۰
۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	۲/۸۳۶۲	۲/۳۷۰۷
-۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۲/۸۳۲۸	۲/۳۶۱۵
۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۲/۶۹۶۵	۳/۳۶۲۰
-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۰/۹۷۶۸	۰/۰۶۲۶
۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۳/۱۷۹۸	۳/۷۴۰۲
-۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۲/۸۳۰۳	۲/۴۱۳۵
۱	۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	-۰/۱۸۴۶	۰/۲۴۲۸
-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۲/۸۴۲۵	۲/۳۴۲۲
۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۲/۶۹۲۰	۲/۷۸۵۱
-۱	۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	۲/۷۶۷۲	۲/۸۱۸۰
۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۲/۸۳۶۳	۰/۴۵۳۵
-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۲/۸۴۸۷	۱/۸۴۴۷
۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۲/۲۶۹۳	۲/۳۴۵۳
-۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	۲/۷۰۳۱	۳/۲۷۹۶
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲/۸۳۱۱	۰/۸۱۱۷
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۲۳	۰/۶۲۱۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۴۸۰۸	۰/۹۸۶۷
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۴۱۴	۰/۲۴۰۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۵۲۴	۰/۵۱۳۲

جدول ۳. نقاط محوری

-۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۳۸	-۰/۱۷۰۵
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۲۴۴	۰/۸۶۹۳
۰	-۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۲۴۰	۰/۷۵۳۸
۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۲۲۸	۰/۵۱۳۵۱
۰	۰	-۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۲۲۵	۰/۶۹۶۶۸
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۲۲۰	۰/۶۷۰۸
۰	۰	۰	-۱	۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۲۴۶	۱/۹۵۱۷۰
۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۲/۶۰۳۶	۲/۴۹۳۴
۰	۰	۰	۰	-۱	۰	۰	۰	۲/۵۳۴۱	۱/۵۸۳۵
۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۲/۵۳۲۴	۰/۳۲۱۴
۰	۰	۰	۰	۰	-۱	۰	۰	۲/۵۳۲۳	۰/۴۶۶۵
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲/۵۳۲۴۱	۰/۷۶۰۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱	۰	۲/۵۳۷۱۵	۱/۰۲۵۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲/۵۳۷۰	۱/۲۷۴۹
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱	۱/۵۷۸۸	۲/۱۹۰۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲/۸۳۵۶	۲/۵۴۲۳

حالت ۱: زنجیره تأمین با اطلاعات غیرمتمرکز

در این حالت، مسأله دارای  $(k=8)$  متغیر می‌باشد. بنابراین برای اعمال وجود خمیدگی، از طرح دارای  $2^{(8-3)}=32$  آزمایش و چهار نقطه مرکزی ارائه شده در جدول ۲ به همراه  $(2k=16)$  نقطه محوری اشاره شده در جدول ۳ استفاده شده است.

حالت ۲: زنجیره تأمین با اطلاعات متمرکز

در این حالت، مسأله دارای  $(k=4)$  متغیر می‌باشد. بنابراین برای اعمال وجود خمیدگی از طرح دارای  $2^4=16$  آزمایش و پنج نقطه مرکزی به همراه  $(2k=8)$  نقطه محوری ارائه شده در جدول ۴ استفاده شده است.

جدول ۴. نتایج اجرای طرح عاملی برای تخمین بهترین تابع در حالت دوم

$\beta$	$\gamma$	L	R	$y_1$	$y_2$
-۱	-۱	-۱	-۱	-۱/۳۷۲	۰/۷۰۹
۱	-۱	-۱	-۱	۲/۴۲۴	۲/۸۲۵
-۱	۱	-۱	-۱	-۱/۴۰۸	۰/۷۰۶
۱	۱	-۱	-۱	-۰/۱۷۵	۰/۲۳۷
-۱	-۱	۱	-۱	-۱/۴۰۴	۰/۸۱۱
۱	-۱	۱	-۱	۳/۰۱۷	۳/۹۳۵
-۱	۱	۱	-۱	-۰/۸۷۹	۰/۴۶۱
۱	۱	۱	-۱	-۰/۱۴۱	۰/۶۲۲
-۱	-۱	-۱	۱	۲/۸۴۶	۱/۴۹۵
۱	-۱	-۱	۱	۲/۸۲۹	۰/۹۵۳
-۱	۱	-۱	۱	۲/۹۸۰	۳/۲۰۹
۱	۱	-۱	۱	۲/۸۴۵	۱/۹۸۰
-۱	-۱	۱	۱	۲/۸۳۳۷	۰/۵۹۲
۱	-۱	۱	۱	۲/۸۳۳۹	۱/۱۳۰
-۱	۱	۱	۱	۲/۸۳۳۴	۰/۱۶۶
۱	۱	۱	۱	۲/۸۳۱	۰/۸۱۲
۰	۰	۰	۰	۲/۵۵۱	۰/۴۲۲
۰	۰	۰	۰	۲/۵۴۱	۰/۰۷۹
۰	۰	۰	۰	۲/۵۵۷	۰/۲۷۸
۰	۰	۰	۰	۲/۵۸۶	۰/۷۱۱
۰	۰	۰	۰	۲/۵۳۲	۰/۶۲۲
-۱	۰	۰	۰	۲/۵۳۴۸	۰/۵۷۳۱

$\beta$	$\gamma$	L	R	$y_1$	$y_2$
۱	۰	۰	۰	۲/۵۳۳۸	۰/۸۳۵۳
۰	-۱	۰	۰	۲/۵۳۲۶۶	۰/۶۲۸۱
۰	۱	۰	۰	۲/۵۳۲۶۹	۰/۶۵۴۶
۰	۰	-۱	۰	۲/۵۴۲۲	۱/۰۳۶۹
۰	۰	۱	۰	۲/۵۴۱۸	۱/۱۲۶۱
۰	۰	۰	-۱	-۰/۶۸۰۹	۰/۴۵۵۶
۰	۰	۰	۱	۲/۸۵۳۰	۱/۷۲۶۱

### الگوریتم گام به گام [۱۹]

در بسیاری از مسائل رگرسیون چندگانه، متغیر یا مجموعه‌ایی از متغیرها که باید وارد مدل رگرسیون شوند از قبل مشخص نیستند. این روش به گونه‌ای است که در هر گام مشخص می‌شود که متغیر مستقلی به مدل باید افزوده و یا از مدل حذف شود. گام ۱: تمام الگوهای شامل یک متغیر مستقل را برازش دهید.

$$F_k = \frac{MSR(X_k)}{MSE(X_k)} \quad k = 1, 2, \dots, p - 1 \quad (7)$$

اگر بزرگترین آماره (7) از یک مقدار از قبل تعیین شده  $Fin$  (حد بالا برای مقایسه با متغیرهای ورودی) بزرگتر باشد، آنگاه متغیری که دارای بزرگترین  $F_k$  بوده به مدل اضافه می‌شود. در غیر این صورت برنامه بدون هیچ متغیر مستقلی به پایان می‌رسد. گام ۲: فرض کنید  $X_s$  متغیر انتخاب شده در مرحله اول باشد، تمام الگوهای شامل دو متغیر مستقل را که یکی از آن‌ها  $X_s$  می‌باشد، برازش کنید و برای هر یک آماره (8) را به دست آورید.

$$F_k = \frac{MSR(X_k|X_s)}{MSE(X_k|X_s)} \quad k \neq s \quad (8)$$

متغیر مستقلی که دارای بزرگترین  $F_k$  باشد، کاندیدای اضافه شدن به الگوست، اگر مقدار  $F_k$  آن از مقدار از قبل تعیین شده  $Fin$  بزرگتر باشد، متغیر بعدی اضافه و در غیر این صورت برنامه به پایان می‌رسد.

گام ۳: فرض کنید در مرحله دوم  $X_p$  انتخاب شده باشد. حال روش گام به گام به دنبال این است که آیا هر یک از متغیرهای موجود به غیر از  $X_t$  را می‌توان از الگو حذف کرد یا خیر؟ برای هر یک از متغیرها به جز  $X_t$  مقدار آماره ۹ را به دست آورید که

کوچکترین آن‌ها کاندیدای حذف شدن از الگو خواهد بود. اگر این مقدار کوچکتر از  $F_{out}$  (حد پایین برای مقایسه با متغیرهای خروجی) باشد، آن متغیر از الگو حذف می‌شود. در غیر این صورت در الگو باقی خواهد ماند.

$$F_k = \frac{MSR(X_k|X_t)}{MSE(X_t, X_k)} \quad t \neq k \quad (9)$$

گام ۴: این کار تا جایی ادامه دارد که هیچ یک از متغیرهای مستقل نه امکان اضافه شدن و نه امکان حذف شدن داشته باشند. باید توجه داشت که:

۱. متغیر می‌تواند در یک مرحله به الگو اضافه شود و در مراحل بعدی حذف شود،
۲. ترتیب ورود متغیرها به هیچ وجه اهمیت آن‌ها را نشان نمی‌دهد. پس از تشکیل مدل با استفاده از روش مرکب مرکزی، به کمک الگوریتم گام به گام برای کسب مدل‌های بهتر با میانگین مربعات خطای کمتر اصلاح شده، نتیجه به قرار زیر است:

### تجزیه و تحلیل آماری

مدل مرتبه دوم برازش شده طبق متغیرهای گذشته و با استفاده از نرم‌افزار (SAS) در زیر نشان داده شده است:

حالت ۱-۱: اثر شلاقی در زنجیره تأمین با اطلاعات غیرمتمرکز  
(۱۰)

$$\begin{aligned} y'_{11} = & 2.5357 - 0.1686L'_1 + 0.3403R'_1 + 0.2869\beta'_2 - 0.1639\gamma'_2 + 0.1934L'_2 + \\ & 1.0271R'_2 - 0.6891R'^2_2 - 0.4076\beta'_1\gamma'_1 + 0.2231\beta'_1\beta'_2 + 0.2175\gamma'_1\beta'_2 + \\ & 0.1546L'_1R'_1 + 0.1838L'_1L'_2 + 0.2353R'_1\beta'_2 + 0.2273R'_1\gamma'_2 - 0.1954R'_1L'_2 - \\ & 0.3013\beta'_2R'_2 - 0.2479\gamma'_2L'_2 - 0.1941L'_2R'_2 \end{aligned}$$

جدول ۵ نتایج آماری را در این حالت نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، مدل ارائه شده (۱۰) از نظر آماری معنا دار است ( $P \text{ value} < 0.0001$ ). بنابراین، می‌توان با اطمینان حداقل ۹۵ درصد پذیرفت که دلایل منتخب، برای پیش‌بینی اثر شلاقی مناسب است. ضریب تعیین مدل  $R^2 = 0.94622$  نشان می‌دهد که ۹۴/۶۲٪ تغییرات اثر شلاقی می‌تواند به وسیله دلایل منتخب محاسبه شود.

در مدل کاهش یافته ۱۰، شش متغیر مستقل عمده فروش از نظر آماری در سطح  $\alpha = 0.05$  معنادار است. از طرفی در این زنجیره سه سطحی غیرمتمرکز که هر سطح

به صورت کاملاً مستقل تصمیمات سفارش دهی خود را اتخاذ می کند، دوره بازپرسی یا دسته بندی سفارش عمده فروش ( $R'_2$ ) در مقدار اثر شلاقی مهم ترین متغیر مستقل محسوب می شود.

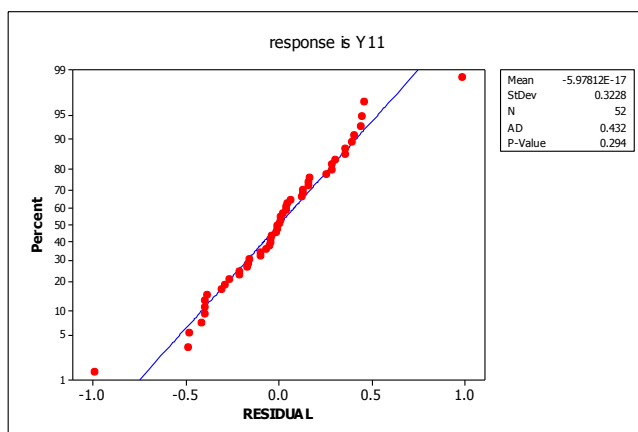
### پذیره نرمال بودن

شیوه مفید برای بررسی پذیره نرمال بودن، رسم نمودار احتمال نرمال مانده هاست. با توجه به شکل ۱ برای مدل برازش شده ۱۰، مشاهده می شود که توزیع تجمعی نرمال در آنها تقریباً به شکل خط مستقیم است.

جدول ۵. اثر دلایل اثر شلاقی در حالت ۱-۱

رتبه بندی	ضریب تعیین (جزیی)	آماره-P	آماره-F	متغیرها
	۰/۹۴۶۲۲۷	۰/۰۰۰۱	۳۲/۲۶	مدل
*	۰/۰۰۰۷	۰/۵۱۶۶	۰/۴۳۱۶	$\beta'_1$
*	۰/۰۰۱۸	۰/۲۹۴۰	۱/۱۴۰۶	$\gamma'_1$
۵	۰/۰۱۲۶	۰/۰۲۱۰	۵/۸۴۱۹	$L'_1$
۲	۰/۰۵۱۵	۰/۰۱۰۱	۷/۱۸۹۵	$R'_1$
۳	۰/۰۳۶۶	۰/۰۱۵۸	۶/۲۸۷۳	$\beta'_2$
۶	۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۶۴	۶/۳۷۳۶	$\gamma'_2$
۴	۰/۰۱۶۶	۰/۰۳۳۹	۴/۸۳۳۱	$L'_2$
۱	۰/۴۶۹۱	۰/۰۰۰۱	۴۴/۱۷۷	$R'_2$

\*: عدم معناداری (رتبه بندی بر اساس اثرات اصلی انجام شده است).



شکل ۱. نمودار نقطه ای احتمال نرمال مانده ها برای مدل اثر شلاقی در حالت ۱-۱

بنابراین، می‌توان در مورد مانده‌ها چنین گفت: مانده‌ها استاندارد، تقریباً نرمال با میانگین صفر و واریانس یکسان هستند. پس می‌توان نتیجه گرفته که مدل ۱۰ برای توصیف داده‌ها از کفایت کافی برخوردار است.

حالت ۱-۲: ذخیره موجودی در زنجیره تأمین با اطلاعات غیرمتمرکز

$$\begin{aligned} y'_{12} = & 0.8348 + 0.1423\beta'_1 - 0.4148\beta'_2 - 0.2907\gamma'_2 + 0.2868L'_2 + \quad (11) \\ & 0.2393R'_2 - 0.8001\beta_1'^2 + 1.073R_1'^2 + 1.2168R_2'^2 - 0.6424\beta_1'\gamma_1' - \\ & 0.4055L_1'L'_2 + 0.2143R_1'\beta_2' + 0.2338R_1'\gamma_2' - 0.1773R_1'L'_2 + \\ & 0.1426\beta_2'L'_2 - 0.555\gamma_2'L'_2 - 0.2233L_2'R'_2 \end{aligned}$$

جدول ۶ نتایج آماری را در این حالت نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، مدل ارائه شده (۱۱) از نظر آماری معنا دار است ( $P \text{ value} < 0.0001$ ). بنابراین، می‌توان با اطمینان حداقل ۹۵ درصد پذیرفت که دلایل منتخب، برای پیش‌بینی ذخیره موجودی مناسب است. ضریب تعیین مدل  $R^2 = 0.90937$  نشان می‌دهد که ۹۰/۹۳٪ تغییرات ذخیره موجودی می‌تواند به وسیله دلایل منتخب محاسبه شود.

در مدل کاهش یافته ۱۱، پنج متغیر مستقل از نظر آماری در سطح  $\alpha = 0.05$  معنادار است. از طرفی در این زنجیره سه سطحی غیرمتمرکز که هر سطح به صورت کاملاً مستقل تصمیمات سفارش‌دهی خود را اتخاذ می‌کند، به روز رسانی پیش‌بینی تقاضا در مقدار ذخیره موجودی، مهم‌ترین دلیل به‌شمار می‌رود.

### پذیره نرمال بودن

باتوجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که توزیع تجمعی نرمال همانند شکل ۱ به صورت خط مستقیم می‌باشد. بنابراین، می‌توان کفایت مدل ۱۱ را پذیرفت.

حالت ۲-۱: اثر شلاقی در زنجیره تأمین با اطلاعات متمرکز

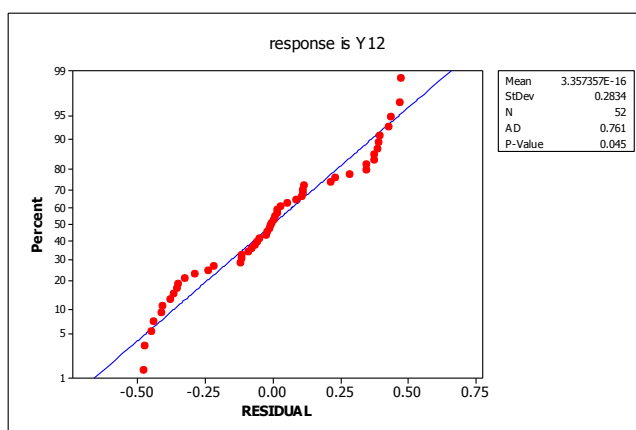
$$\begin{aligned} y'_{21} = & 2.5443 + 0.5574\beta' - 0.2846\gamma' + 1.4615R' - 1.01518R'^2 - \\ & 0.398\beta'\gamma' - 0.6462\beta'R' + 0.3385\gamma'R' \quad (12) \end{aligned}$$



جدول ۶. اثر دلایل اثر شلاقی در حالت ۲-۱

رتبه بندی	ضریب تعیین (جزیی)	آماره-P	آماره-F	متغیرها
	۰/۹۰۹۳۷۸	۰/۰۰۰۱	۲۱/۹۵	مدل
۵	۰/۰۰۸۱	۰/۰۹۴۱	۲/۹۷۱۴	$\beta'_1$
*	۰/۰۰۵۲	۰/۱۵۸۷	۲/۰۷۶۶	$\gamma'_1$
*	۰/۰۰۱۹	۰/۳۷۲۰	۰/۸۲۴۲	$L'_1$
*	۰/۰۰۰۱	۰/۸۶۰۱	۰/۰۳۱۹	$R'_1$
۱	۰/۰۶۸۹	۰/۰۰۴۸	۸/۷۴۶۸	$\beta'_2$
۲	۰/۰۳۳۹	۰/۰۲۲۹	۵/۵۴۸۷	$\gamma'_2$
۳	۰/۰۳۳۰	۰/۰۱۸۳	۶/۰۰۳۰	$L'_2$
۴	۰/۰۲۳۰	۰/۰۳۹۴	۴/۵۱۳۷	$R'_2$

\* : عدم معناداری (رتبه بندی براساس اثرات اصلی انجام شده است).



شکل ۲. نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال مانده‌ها برای مدل ذخیره موجودی در حالت ۲-۱

حالت ۲-۲: ذخیره موجودی در زنجیره تأمین با اطلاعات متمرکز

$$y'_{22} = 0.6635 + 0.2558\beta' - 0.235\gamma' - 0.1942L' + 0.6349\beta'^2 - 0.383\beta'\gamma' + 0.287\beta'L' - 0.345\beta'R' - 0.285\gamma'L' + 0.5158\gamma'R' - 0.393L'R' \quad (13)$$

جداول ۷ و ۸ نتایج آماری این دو حالت را نشان می‌دهد.

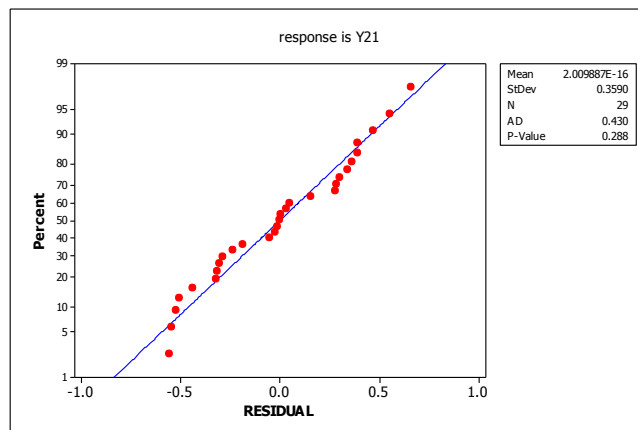
جدول ۷. اثر دلایل اثر شلاقی در حالت ۱-۲

رتبه بندی	ضریب تعیین (جزیی)	آماره-P	آماره-F	متغیرها
	۰/۹۴۲۷۸۳	۰/۰۰۰۱	۴۹/۴۳	مدل
۲	۰/۰۸۰۴	۰/۰۰۱۱	۱۳/۶۸۵	$\beta'$
۳	۰/۰۲۱۰	۰/۰۱۱۴	۷/۶۹۳۳	$\gamma'$
*	۰/۰۰۰۷	۰/۶۲۶۷	۰/۲۴۴۹	$L'$
۱	۰/۵۵۲۵	۰/۰۰۰۱	۳۳/۳۳۵	$R'$

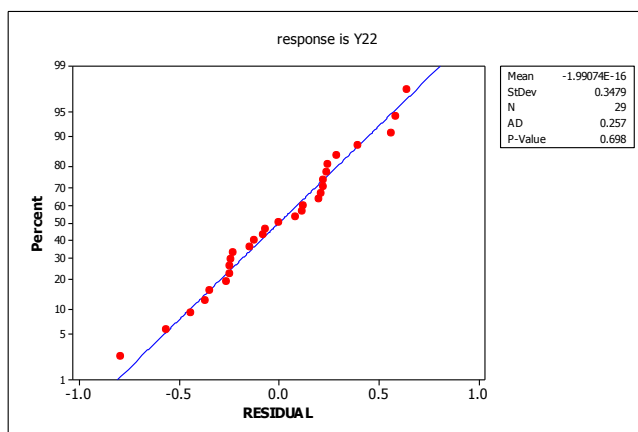
جدول ۸. اثر دلایل اثر شلاقی در حالت ۲-۲

رتبه بندی	ضریب تعیین (جزیی)	آماره-P	آماره-F	متغیرها
	۰/۸۲۰۹۶۰	۰/۰۰۰۱	۸/۲۵	مدل
۱	۰/۰۵۰۴	۰/۰۵۸۶	۴/۰۲۱۶	$\beta'$
۲	۰/۰۴۲۵	۰/۰۶۳۶	۳/۸۸۱۱	$\gamma'$
۳	۰/۰۲۹۰	۰/۱۰۴۷	۲/۹۲۰۳	$L'$
*	۰/۰۰۴۰	۰/۵۲۹۵	۰/۴۱۳۲	$R'$

\* : عدم معناداری (رتبه بندی بر اساس اثرات اصلی انجام شده است).



شکل ۳. نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال مانده‌ها برای مدل اثر شلاقی در حالت ۲-۱



شکل ۴. نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال مانده‌ها برای مدل ذخیره موجودی در حالت ۲-۲

باتوجه به جداول ۷ و ۸، مدل‌های ارائه‌شده (۱۲) و (۱۳) از نظر آماری معنادار است ( $P \text{ value} < 0.0001$ ). ضریب تعیین مدل‌ها به ترتیب  $R^2 = 0.94278$  و  $R^2 = 0.82096$  نشان می‌دهد که  $94/278\%$  و  $82/096\%$  تغییرات اثر شلاقی و ذخیره موجودی می‌تواند به وسیله دلایل ارائه‌شده در جداول محاسبه شود. در مدل کاهش یافته ۱۲ و ۱۳، سه متغیر مستقل از نظر آماری در سطح  $\alpha = 0.05$  معنادار است. از طرفی در این زنجیره سه سطحی متمرکز، مهمترین دلیل در توابع اثر شلاقی و ذخیره موجودی با توجه به جداول ۸ و ۹ به ترتیب  $R'$  و  $\beta'$  می‌باشد.

### پذیره نرمال بودن

باتوجه به شکل ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که توزیع تجمعی نرمال و نمودار نقطه‌ای تقریباً به صورت خط مستقیم می‌باشد. بنابراین، با کمی اغماض از نقاط نه چندان پراکنده می‌توان کفایت مدل ۱۲ و ۱۳ را پذیرفت.

### مقایسه مدل‌ها

باتوجه به مدل‌های ارائه‌شده در قسمت‌های قبل، به بررسی اهمیت هر یک از دلایل اثر شلاقی در مدل‌ها پرداخته می‌شود. در این راستا برای مقایسه می‌توان از ضرایب تعیین جزئی استفاده کرد.

جدول ۹. ضریب تعیین جزئی پارامترها در اثر شلاقی

+-				عمده فروش				سطح / زنجیره
$\beta'_{(1)}$	$\gamma'_{(1)}$	$L'_{(1)}$	$R'_{(1)}$	$\beta'_2$	$\gamma'_2$	$L'_2$	$R'_2$	
۰/۰۸۰۴	۰/۰۲۱۰	*	۰/۵۵۲۵	-	-	-	-	متمرکز
*	*	۰/۰۱۲۶	۰/۰۵۱۵	۰/۰۳۶۶	۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۶۶	۰/۴۶۹۱	غیرمتمرکز

جدول ۱۰. ضریب تعیین جزئی پارامترها در ذخیره موجودی

خرده فروش				عمده فروش				سطح / زنجیره
$\beta'_{(1)}$	$\gamma'_{(1)}$	$L'_{(1)}$	$R'_{(1)}$	$\beta'_2$	$\gamma'_2$	$L'_2$	$R'_2$	
۰/۰۵۰۴	۰/۰۴۲۵	۰/۰۲۹۰	*	-	-	-	-	متمرکز
۰/۰۰۸۱	*	*	*	۰/۰۶۸۹	۰/۰۳۳۹	۰/۰۳۳۰	۰/۰۲۳۰	غیرمتمرکز

باتوجه به جدول ۹ مشاهده می‌شود که در زنجیره متمرکز سه علت دسته‌بندی سفارشات، به‌روزرسانی تقاضا، بازی‌های کمبود و جیره‌بندی به‌ترتیب از مهم‌ترین دلایل به‌شمار می‌روند. این سه علت حداقل ۶۵ درصد اثر شلاقی را توضیح می‌دهد و مابقی صرف تعاملات آن‌ها می‌شود. اما در زنجیره غیرمتمرکز، پارامترهای عمده فروش نسبت به خرده‌فروش تأثیر بیشتری بر مقدار اثر شلاقی دارد. در این حالت نیز فاکتور دسته‌بندی سفارشات، به‌عنوان مهم‌ترین دلیل اثر شلاقی شناخته شده است. علت اصلی ایجاد این فاکتور، هزینه‌های زیاد سفارش‌دهی و حمل و نقل می‌باشد. با استفاده از دسته‌بندی سفارش، شرکت‌ها قادرند تعداد دفعات سفارش را برای رسیدن به ارسال در مقیاس اقتصادی، کاهش دهند. به‌هرحال، این اقدام باعث ایجاد اثر شلاقی می‌شود. استفاده از تبادل الکترونیکی داده، لجستیک طرف سوم و همکاری‌های استراتژیکی برای برطرف کردن این عامل توصیه می‌شود. باتوجه به جدول ۱۰ که طرف دیگر بحث است، مشاهده می‌شود که در زنجیره متمرکز سه علت به‌روزرسانی تقاضا، بازی‌های کمبود و تأخیر در اطلاعات و مواد به‌ترتیب از مهم‌ترین دلایل محسوب می‌شود. اما در زنجیره غیرمتمرکز، باز مشاهده می‌شود که پارامترهای عمده‌فروش تأثیر بیشتری بر مقدار ذخیره موجودی دارد. در این حالت نیز فاکتور به‌روزرسانی تقاضا، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دلایل ذخیره موجودی محسوب می‌شود. زمانی که پیش‌بینی‌ها صرفاً بر مبنای سفارشات عضو پایین دست صورت می‌گیرد، هر نوسانی در تقاضای

مشتری به صورت سفارشات تقویت شده به بالای زنجیره ارسال می شود. برای جلوگیری از این رویه باید اطلاعات تقاضا در سراسر زنجیره به اشتراک گذاشته شود. از آنجایی که هدف تولید تابع اثر شلاقی کاهش آن است. اما ممکن است در این راستا با کاهش بی رویه سطح موجودی، سطح خدمت دهی به مشتری کاهش یابد. بنابراین، با توجه به نتایج ارائه شده این جداول می توان با تنظیم مهم ترین دلایل، به تبادل بهینه سطح اثر شلاقی و ذخیره موجودی پرداخت. در ادامه برای تجزیه و تحلیل اعتبارسنجی مدل های ارائه شده، نتایج آزمایشات قبل و بعد از به کار بردن مدل ها را با استفاده از ضریب همبستگی مقایسه می کنیم. جدول ۱۱ نشان می دهد که رابطه های (۱۱) و (۱۳) همبستگی زیادی با شبیه سازی ذخیره موجودی در هر دو زنجیره دارد. و همبستگی متوسطی بین رابطه های (۱۰) و (۱۲) با شبیه سازی اثر شلاقی در هر دو زنجیره برقرار است.

جدول ۱۱. مقایسه توانایی پیش بینی مدل های RSM

زنجیره غیر متمرکز		زنجیره متمرکز		ضریب همبستگی
ذخیره موجودی	اثر شلاقی	ذخیره موجودی	اثر شلاقی	
۰/۸۴۸۶۲۲	۰/۶۱۱۱۴۱	۰/۹۹۶۵۵۹	۰/۵۷۹۵۶	شبیه سازی - RSM

### نتیجه گیری

در این پژوهش، اثرات دلایل اثر شلاقی بر مقادیر اثر شلاقی (تقویت تقاضا) و تقویت ذخیره موجودی در غالب یک تابع و در دو حالت زنجیره متمرکز و غیر متمرکز مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از چهار دلیل اصلی اثر شلاقی به روزرسانی پیش بینی تقاضا، بازی های کمبود و جیره بندی، دسته بندی سفارشات و تأخیر در اطلاعات و مواد به عنوان متغیرهای مستقل توابع در شبیه سازی کامپیوتری مورد استفاده قرار گرفت. بعد از جمع آوری اطلاعات مربوط به تغییر متغیرهای مستقل، در آنالیز واریانس مشخص شد که بعضی از دلایل هیچ گونه تأثیری بر مقادیر اثر شلاقی و ذخیره موجودی نداشته و صرفاً به صورت ترکیبی از دلایل دیگر، تأثیر گذار است. نتایج جداول ۹ و ۱۰ نشان داد که در زنجیره غیر متمرکز، پارامترهای بالای زنجیره (عمده فروش) نسبت به پایین زنجیره (خرده فروش) در تعیین مقدار اثر شلاقی از اهمیت

بیشتری برخوردار است. از طرفی چون هدف، کاهش همزمان اثر شلاقی و ذخیره موجودی می‌باشد. بنابراین، می‌توان از پارامتر دسته‌بندی سفارشات (در هر دو حالت متمرکز و غیرمتمرکز) در جهت کاهش اثر شلاقی و از پارامتر بازی‌های کمبود و جیره‌بندی (در هر دو حالت متمرکز و غیرمتمرکز) در جهت کاهش ذخیره موجودی استفاده کرد.

## منابع

1. Konicki, S., "Now in Bankruptcy, Kmart struggled with supply chain", Information Week, Accessed on 28 January, 2002.
2. Disney, S.M., Farasyn, I., Lambrecht, M., Towill, D. R., and Van de Velde, W., "Taming the bullwhip effect whilst watching customer service in a single echelon of a supply chain," European Journal of Operational Research, 173, pp. 151–172, 2006.
3. Sterman, J., "Modelling managerial behaviour: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment", Management Science, 35, pp.321–339, 1989.
4. Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R. and Towill, D.R., "The impact of information enrichment on the bullwhip effect in supply chains: a control engineering perspective", European Journal of Operational Research, 152, pp.727–750, 2004.
5. Lee, H.L., Padmanabhan, P., Whang, S., "The bullwhip effect in supply chains", Sloan Management Review 38, PP.93–102, 1997a.
6. Lee, H.L., Padmanabhan, P., Whang, S., "Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect", Management Science 43, PP. 546–558, 1997b.
7. Holmstrom, J., "Product range management: A case study of supply chain operations in the European grocery industry", Supply Chain Management 2(3), PP.107–115, 1997.
8. Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J., Simchi-Levi, D., "Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information", Management Science 46 (3), pp.436–443, 2000a.
9. Chen, F., Ryan, J., Simchi-Levi, D., "The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect", Naval Research Logistics 47 (4), PP.271–286, 2000b.
10. Simon, H.A., "On the application of servomechanism theory in the study of production control", Econometrica, 20, PP.247–268, 1952.
11. Hsieh, K.L., Chen, Y.K., Shen, C.C., "Bootstrap confidence interval estimates of the bullwhip effect", Simulation Modeling Practice and Theory, 15, pp.908–917, 2007.
12. Sucky, E., "The bullwhip effect in supply chains—An overestimated problem?", Int. J. Production Economics, 118, pp.311-322, 2009.
13. Silver, E.A., Pyke, D.F., and Peterson, R., "Inventory Management and Production Planning and Scheduling", New York, USA: John Wiley and Sons, 1998.
14. Zipkin, P.H., "Foundations of Inventory Management", New York, USA: McGraw-Hill, 2000.
15. Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R. and Towill, D. R., "Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach," European Journal of Operational Research, vol. 147, no. 3, pp. 567–590, 2003.
16. Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R. and Towill, D.R., "Measuring the bullwhip effect: a control theoretic approach to analyse forecasting induced bullwhip in orderup-to policies", European Journal of Operational Research, 147, pp.567–590, 2003.

17. Myers, R.H. and Montgomery, D. C., **“Response Surface Methodology: process and optimization using designed experiment”**, John Wiley and sons Inc, 1995.
18. Neter, J., Kunter, M.H. & et al., **“Applied Linear Statistical Methods”**, 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, New York, 1996.
19. Hocking, R.R., **“The analysis and selection of variables in linear regression”**, Biometrics, 32, pp.1-50, 1976.