****

**رویکرد مبتنی بر مقاومت بسیار بهینه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین چند مرحله ای و چند محصولی**

**چکیده**

در این مقاله الگوریتمی نام مقاومت بسیار بهینه (HOT) برای حل مسئله طراحی شبکه کنترل زنجیره تأمین چند محصولی، چندمرحله‌ای ارائه می­کنیم. HOT بر مبنای قانون توان و نظریه کنترل است. این رویکرد پیشنهادی ویژگی­های خود را از الگوریتم افزایش محلی (LIA) کسب می­کند، که ابتدا برای به حداکثر رساندن پارامتر طراحی (مثل محصول)، به ویژه در مدل نفوذ به کار رفت. LIA به نوعی به تکامل از طریق طرح انتخاب طبیعی شباهت دارد. روش­شناسی پیشنهادی فضای جستجوی گسترده­ای را بررسی کرده و از نظر محاسباتی ماندگار است. الگوریتم HOT تلاش می­کند تا این سیستم را در هر مرحله از بهینه­سازی قوی­تر کند. هدف این مقاله کاهش هزینه کلی توزیع زنجیره تأمین با انتخاب تعداد مناسب امکانات در شبکه است. برای بررسی اثربخشی الگوریتم HOT، نتایج حاصل از کاربرد موارد مشابه در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین را مشکلات مختلف و مجموعه داده­های مشابه مقایسه می­کنیم.

**کلیدواژه**: بهینه­سازی، موارد مشابه، طراحی زنجیره تأمین

**1. مقدمه**

در بازار رقابتی و جهانی امروز، موفقیت یک صنعت به مدیریت زنجیره تأمین آن بستگی دارد. طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل عناصر داخلی و خارجی مدیریت زنجیرۀ تأمین می­شود. امروز، مشتریان محصولاتی با حداقل هزینه می­خواهند، بنابراین مهم است که یک شرکت کارخانه، خرده­فروش، تأمین­کننده، مراکز توزیع و منطقه مشتری را به روشی سازمان­دهی کند که مشتریان بتوانند محصولات را حداقل هزینه ممکن تهیه کنند و این شرکت­ها باید سود نیز داشته باشند. در سال­های اخیر، تعداد زیادی از محققان مدل­های مختلفی را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه کرده­اند. مدل مربوط به طراحی شبکه زنجیره تأمین به خاطر تقاضای مشتری هرازگاهی تغییر می­کند. مشکل طراحی شبکه زنجیره تأمین مهم­ترین مسئله تصمیم­گیری است که باید برای عملکرد مؤثر بلندمدت در کل زنجیره تأمین بهینه­سازی شود. یک شبکه زنجیره تأمین کارآمد پلتفرمی بهینه برای مدیریت زنجیره تأمین ارائه می­کند. مدیریت زنجیره تأمین برای مدیریت هزینه، ریسک، حاشیه سود و مدیریت موجودی به کار می­رود و با سایر مؤثر بر شرکت و مشتری همکاری دارد. اطلاعات، محصولات و سرمایه دائماً میان مراحل شبکه زنجیره تأمین جریان دارد. توزیع این محصولات محرکی کلیدی برای سوددهی کلی شرکت­ها است و مستقیماً بر هزینه­های زنجیره تأمین اثر می­گذارد.

مدل توزیع زنجیره تأمین که در اینجا از آن بحث می­شود به مسئله طراحی شبکه چند محصولی، چندمرحله‌ای مرتبط است. مسئله پیشنهادی سختی NP است و برای حل روش­های قطعی آسان نیست. ، بنابراین از تکنیک­های AI برای حل این نوع از مسائل استفاده می­کنیم. در این مقاله یک رویکرد بهینه­سازی جدید را بر مبنای الگوریتم مقاومت بسیار بهینه (HOT) ارائه می­کنیم که این الگوریتم توسط کارلسون و دویل (1999) معرفی شده است. الگوریتم HOT فضای جستجوی گسترده­ای دارد و تلاش دارد تا این سیستم را در هر مرحله از بهینه­سازی قوی­تر کند. بر مینای قانون توان و نظریه کنترل است. الگوریتم HOT نتایجی رضایت­بخش را برای مسئله طراحی شبکه پیچیده ارائه می­کند و از نظر محاسباتی نیز ماندگار است. بنابراین از الگوریتم HOT که در اینجا از آن بحث شده برای محل مسئله طراحی شبکه استفاده کردیم.

مابقی مقاله به این صورت است. بخش دوم آثار مرتبط پیشین را ارائه می­کند که همۀ ابعاد طراحی شبکه زنجیره تأمین را پوشش می­دهد و همچنین در مورد مسئله و روش به کار رفته در این مقاله بحث می­کند. بخش سوم مدل ریاضیاتی طراحی شبکه زنجیره تأمین چند محصولی، چندمرحله‌ای را پوشش می­دهد. بخش چهارم روش راه­حل مبتنی بر الگوریتم HOT را ارائه می­کند. بخش پنجم مقایسه­ای با موارد مشابه است. بخش ششم روش موارد مشابه را توضیح می­دهد و بخش هفتم تحلیل تجربی مسئله پیشنهادی را موردبحث قرار می­دهد. بخش هشتم نتایج محاسباتی را گزارش می­کند و بخش نهم به نتیجه­گیری می­پردازد.

**2. آثار مرتبط**

طراحی شبکه زنجیره تأمین پلتفرمی بهینه برای مدیریت کارآمد زنجیره تأمین ارائه می­کند. امکانات مختلفی مانند تأمین­کنندگان، واحدهای صنعتی، مراکز توزیع، خرده­فروشان، انبارها و مناطق مشتری را جمع­آوری کرده به‌گونه‌ای که مشتریان با کمترین هزینه ممکن سود محصول را دریافت می­کنند و شرکت حاشیه سود خود را حفظ می­کند. زنجیره تأمین شبکه­ای از تأمین­کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع­کنندگان و مشتریانی است که از طریق حمل­ونقل، به اشتراک­گذاری اطلاعات و زیرساخت­های مالی با هم در ارتباط هستند (کاپرا، 2003). تأمین­کنندگان در آغاز این شبکه هستند و مواد خام را برای واحد صنعتی فراهم می­کنند. هر واحد صنعتی بیش از یک تأمین­کننده دارد. این واحد صنعتی محصولاتی تولید شده را در اختیار مراکز توزیع قرار می­دهد. هر واحد صنعتی و مراکز توزیع ظرفیتی مشخص دارند و نمی­توانند از آن ظرفیت فراتر روند. مشتریان در انتهای این زنجیره تأمین قرار دارند؛ معمولاً هر مشتری برای یک مرکز توزیع واحد است. در سال­های اخیر، مسئله طراحی زنجیره تأمین اهمیت زیادی را به خود اختصاص داده و این به خاطر افزایش رقابت­پذیری موجود در جهانی­ شدن بازار است (توماس و گریفیت، 1996). شرکت­ها تقاضای سطوح بهتری از خدمات مشتری را دارند درحالی­که آنها مجبورند هزینه­ها را به حداقل برسانند و حاشیه سود را حفظ کنند. زنجیره تأمین شامل سطوح مختلفی مانند تأمین­کننده، واحد صنعتی، انبار، خرده­فروش، مراکز توزیع و مشتریان می­شود. سورانا و دیگران (2005) یک شبکه زنجیره تأمین را از منظر یک سیستم تطبیقی پیچیده پیشنهاد می­کنند و در مورد ابعاد مختلف یک زنجیره تأمین پیچیده بحث می­کنند.

معمولاً، سازمان­های بازاریابی، توزیع، برنامه­ریزی، تولید و خرید همراه با زنجیره تأمین به صورت مستقل از هم عمل می­کنند. اگرچه این شرکت­ها هرکدام اهداف مخصوص خود را دارند، به مکانیسمی نیاز هست که می­تواند موجب همکاری میان این لایه­ها شود. طراحی زنجیره تأمین مکانیسمی که در آن همه شرکت­ها جمع شده، درحالی­که اهداف کلی آنها مشابه است. در یک زنجیره تأمین، جریان کالاها میان تأمین­کننده و مشتری مراحل مختلفی دارد و هر مرحله شامل امکانات مختلفی می­شود (صبری و بیمون، 2000). طراحی شبکه زنجیره تأمین (SCN) برای ارائه محیطی کارآمد و مناسب برای مدیریت زنجیره تأمین (SCM) به کار می­رود. یانگ و دیگران (2002) سیستمی را برای مدیریت شبکه زنجیره تأمین ارائه کردند که شامل یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین بهینه می­شود، یک ماژول برنامه­ریزی یکپارچه برای عملیات توزیع که تأمین­کنندگان مواد خام را برای مشتریان پوشش می­دهد، مدلی مدیریتی که مدل­بندی ریاضیاتی منعطف و مدیریت داده­ها را پشتیبانی می­کند. هانگوی و دیگران (2009) یک شبیه­سازی مبتنی بر بهینه­سازی را برای طراحی شبکه توزیع تولید چندمنظوره تصادفی ایجاد کردند. یک مدل برنامه­ریزی چند دوره­ای، چندمرحله‌ای و چند محصولی برای مقابله اهداف مختلف تناسب ناپذیر در شبکه زنجیره تأمین چند سطحی با تقاضای نامشخص بازار و قیمت محصولات توسط چن و لی (2004) ارائه شده است. پارک (2005) رویکردی یکپارچه برای برنامه­ریزی تولید و توزیع در مدیریت زنجیره تأمین ارائه کرد. انریکو و دیگران (1999) بر ادغام برنامه­ تولید و توزیع در زنجیره تأمین مروری انجام داده است.

در یک طراحی شبکه زنجیره تأمین کارآمد، باید امکاناتی (واحدهای صنعتی و مراکز توزیع (DCs)) را برای افتتاح انتخاب کرد و برای طراحی این شبکه و تقاضای مشتری با حداقل هزینه برآورده می­شود و شرکت حداکثر سود را به دست می­آورد. این مسئله تخصیص موقعیت مکانی است. طراحی شبکه زنجیره تأمین یکی از مهم­ترین مکانیسم­های به کار رفته برای مدیریت بلندمدت زنجیره تأمین کارآمد است. SCN تعداد تأمین­کنندگان، موقعیت مکانی، انواع واحد صنعتی، ظرفیت، انواع انبار و انواع مراکز توزیع مورد استفاده را مشخص می­کند. SCN نیز کانال­های توزیع و مقدار مواد و کالاها را برای مصرف، تولید و انتقال از تأمین­کننده با مشتری مشخص می‌کند. در مسئله طراحی این شبکه، یک واحد صنعتی مواد را از تأمین­کنندگان مختلف دریافت می­کند و سپس مراکز توزیع مختلفی (DCs) را تأمین می­کند، که در نهایت به مشتری عرضه می­شود.

از این روی شبکه زنجیره تأمین چندمرحله­ای (MSCN) برای توصیف شبکه زنجیره تأمین استفاده می­شود. زمانی که این امکانات (واحدهای صنعتی و DCs) ظرفیت مشخصی داشته باشند، مشکل بالا بردن ظرفیت موقعیت مکانی است. ازاین‌رو حل بهینۀ مسئله چندمرحله‌ای دشوار است، به ویژه اگر محدودیت­های ظرفیتی بر واحدهای صنعتی و DCs تحمیل شود، محققان از روش­های اکتشافی زیادی برای حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین استفاده کرده­اند. ریکاردو و دیگران (2008) مدلی بهینه را برای مسئله تخصیص مکان پویا ارائه کرده­اند.

بسیار از محققان انواع مختلفی از رویکردهای اکتشافی را برای حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت شرایط مختلف ارائه کرده­اند. جایارمان و پیرکول (2001) رویکردی اکتشافی را بر مبنای آرامش لاگرانژی در مسئله طراحی SCN تک منبع، چند محصولی، چندمرحله‌ای ارائه کرده­اند. آلتیپارماک و دیگران (2009) یک رویکرد الگوریتم ژنتیکی حالت پایدار را برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین چند محصولی ارائه کردند. رویکرد اکتشافی دیگر بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین توسط آلتیپارماک و دیگران (2005) ارائه شده است. جوهر و بالاجی (2007) نیز یک رویکرد اکتشافی را بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای مسئله توزیع زنجیره تأمین دومرحله‌ای همراه با یک شارژ ثابت ارائه کرده­اند. یه (2006) الگوریتمی را بر مبنای الگوهای رفتاری کارآمد برای مسئله شبکه زنجیره تأمین چندمرحله‌ای ارائه کرد. جایارامان و راس (2003) روش موارد مشابه را برای مدیریت و طراحی شبکه توزیع ارائه کردند. سیاریف و دیگران (2002) مدلی درختی را بر مبنای رویکرد GA برای مسئله طراحی SCN چند منبعی، تک محصولی، تک‌مرحله‌ای پیشنهاد کرده­اند. آلتیپارماک و دیگران (2006) راه­حل جدیدی را بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه کرده­اند تا مجموعه­ای از راه­حل­های پارتو-بهینه را برای مسئله طراحی SCN چندمنظوره پیدا کنند. ژن و سیاریف (2005) رویکرد الگوریتم ژنتیک ترکیبی را برای برنامه­ریزی توزیع/تولید در دوره­های زمانی چندگانه ارائه کرده­اند. میشلویز و دیگران (1991) یک الگوریتم ژنتیک غیراستاندارد را برای حل مسئله انتقال شارژ ثابت ارائه کردند. هانگ و پارک (2002) مدلی ترکیبی از برنامه­ریزی توزیع/تولید و طراحی شبکه برای SCN ارائه کردند. چان و دیگران (2005) رویکردی ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و AHP (فرایند سلسله­­مراتبی تحلیلی) برای مسئله تولید و توزیع در مدل­های زنجیره تأمین چند فاکتوره ارائه کردند. بیمون (1998) مدل­ها و روش­هایی برای تحلیل و طراحی زنجیره تأمین ارائه کردند. جانگ و دیگران (2002) مدلی ترکیبی از طراحی شبکه و برنامه­ریزی توزیع/تولید را برای شبکه زنجیره تأمین ارائه کردند. یک رویکرد چندمنظوره برای برنامه­ریزی عملیاتی و استراتژیک همزمان در طراحی زنجیره تأمین توسط صبری و بیمون (2000 الف) ارائه شد. آیتوگ و دیگران (2003) از یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مدیریت عملیات و تولید استفاده کردند. ژوو و دیگران (2002) یک رویکرد الگوریتم ژنتیک را برای تخصیص متوازن مشتریان به مراکز توزیع چندگانه در شبکه زنجیره تأمین پیشنهاد کردند. کانان و دیگران (2009) یک الگوریتم ژنتیک و بهینه­سازی ذرات را برای مسئله زنجیره تأمین حلقه مسدود ارائه کردند.

در چند دهه اخیر انواع مختلفی از روش­های AI وجود داشته که برای بهینه­سازی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین استفاده شده­اند. ریویز (1995 ب) روش­های AI مختلفی را برای شیوه­های اکتشافی مدرت در مسائل ترکیبی پیشنهاد کرد. در این مقاله، یک رویکرد اکتشافی را بر مبنای HOT برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین چندمرحله‌ای، چند محصولی، تک منبع ارائه می­کنیم. HOT چهارچوبی جدید برای بررسی رفتار سیستم­های پیچیده در محیطی نامشخص است. کارلسون و دویل (1999) HOT را ارائه کرده­اند، و در آن از رفتار ارگانیسم­های بیولوژیکی و روش­های مهندسی پیشرفته الهام گرفته­اند. HOT بر مبنای قانون توان و نظریه کنترل است. کارلسون و دویل (2000 الف) نیز یک رویکرد HOT را برای قدرت و طراحی سیستم­های پیچیده پیشنهاد کردند. کارلسون و ژو (2000) نشان دادند که HOT مکانیسمی برای قانون توان در سیستم­های پیچیده و بر مبنای طراحی قوی سیستم­های در محیط­های نامشخص است. ژیانگنینگ و ژیکوین (2008) یک مدل HOT را برای توصیف آمار مجموعه قوی در محیط نامشخص ارائه کردند و از آن برای تحلیل خاموشی­های برقی رخ داده در شبکه برق آمریکای شمالی استفاده کردند. ویکیک (2007) یک مدل الهام گرفته از HOT را برای سیستم­های بزرگ مقیاس ارائه کرده است. آنها نشان دادند که قوانین توان چگونه در رویدادها چگونه از حداقل هزینه­ها در مواجهه با طرح معامله ظاهر می­شوند. HOT مکانیسمی برای پیچیدگی است که در آن ویژگی­های غیر کلی مستقیماً و بدون معرفی ظاهر می­شوند. HOT به قانون توان برای سیستم­ها منجر می­شود که برای جریانات طراحی شکننده و رایج و آشفتگی­های نادر قوی است. ویژگی اصلی وضعیت HOT حساسیت به آشفتگی­های غیرمنتظره ب تغییرات سیستماتیک در محیط است. رابرت و دیگران (2001) پیامدهای دو ویژگی جدید را در مقاومت بسیار بهینه (HOT) بررسی کردند، مکانیسمی که نشان می­دهد چگونه در سیستم­هایی که برای عملکرد قوی در حضور یک محیط بیرونی سخت بهینه شده­اند، پیچیدگی به وجود می­آید. در ابتدا، HOT در محیطی شامل کاربردهای خاص از جمله اینترنت، شبکه برق، آتش­سوزی و شبکه­های بیولوژیکی استفاده شد. لین و بو (2008) از HOT برای تحلیل داده­های مربوط به خاموشی شبکه برف آمریکای شمالی استفاده کردند. HOT برای بهینه­سازی محلی و جهانی مناسب است.

**3. مدل ریاضیاتی**

مدل ریاضیاتی که در این بخش از آن بحث می­شود، برنامه­ای ترکیبی برای مسئله طراحی SCN تک منبعی، چند محصولی، چندمرحله‌ای است. در این مسئله مجموعه­ای از واحدهای صنعتی و DCs را برای تحلیل انتخاب کرده و استراتژی شبکه توزیع را طراحی کرده که مورد رضایت ظرفیت و تقاضای مشتری برای همه محصولات خریداری شده توسط مشتریان با حداقل هزینه است. در این مسئله فرضیاتی مشخص را طرح می­کنیم. اولین فرضیه این است که تعداد تأمین­کنندگان و تقاضای آنها (ظرفیت) نامشخص است، دوم، تعداد واحدهای صنعتی، تعداد DCs و حداکثر گنجایش آنها مشخص نیست. شکل 1 مسئله طرح شبکه زنجیره تأمین چندمرحله‌ای، چند محصولی را نشان می­دهد.



شکل 1: یک شبکه ساده زنجیره تأمین سه مرحله­ای از آلتیپارماک (2009)

نکات زیر برای توصیف مدل ریاضیاتی مسئله طرح شبکه زنجیره تأمین استفاده می­شود.

**شاخص­ها**

I مجموعه­ای از مشتریان ($i \in I$)

J مجموعه­ای از DCs ($j \in J$)

K مجموعه­ای از واحدهای صنعتی ($k\in K$)

L مجموعه­ای از محصولات ($l \in L$)

S مجموعه­ای از تأمین­کنندگان ($s \in S$)

R مجموعه­ای مواد خام ($r \in R$)

**متغیرها**

$x\_{j}$ 1 اگر DC j باز شود، در این صورت 0 است.

$p\_{k}$ 1 اگر واحد صنعتی K باز شود، در غیر این صورت 0 است.

$y\_{ij}$ 1 اگر DC j برای مشتری I باشد، در غیر این صورت 0 است.

 $b\_{skr}$کمیت مواد خام r منتقل شده از تأمین­کننده s به واحد صنعتی k

 $z\_{lk}$کمیت محصول l تولید شده در واحد صنعتی k

$q\_{ijl}$ کمیت محصول l منتقل شده از DCj به مشتری i

$f\_{jkl}$ کمیت محصول l منتقل شده از واحد صنعتی k به DCj

**پارامترها**

$Q\_{k}$ ظرفیت واحد صنعتی k

$T\_{j}$ عملکرد سالیانه در DC j

$Q\_{sr}$ ظرفیت تأمین­کننده s برای مواد خام r

$D\_{il}$ تقاضا برای محصول l در مشتری i

$N$ حداکثر تعداد DCs

$P$ حداکثر تعداد واحدهای صنعتی

$F\_{j}$ هزینه ثابت سالیانه برای عملکرد DCj

$C\_{k}$ هزینه ثابت سالیانه برای عملکرد واحد صنعتی k

$U\_{j}$ هزینه واحد عملکرد DC در محیط j

$U\_{lk}$ هزینه تولید واحد برای محصول l در واحد صنعتی k

$c\_{ijl}$ هزینه حمل­ونقل واحد برای محصول l از DCj به مشتری i

 $a\_{jkl} $هزینه حمل­ونقل واحد برای محصول l از واحد صنعتی k به DCj

 $P\_{skr}$هزینه حمل­ونقل واحد و خرید برای مواد خام r از تأمین­کننده s به واحد صنعتی k

 $s$ میزان نیاز به فضا برای محصول l در یک DC

$m\_{1}$ میزان استفاده از ظرفیت در هر واحد از محصول l

$u\_{rl}$ میزان کاربرد مواد خام r در هر واحد

این مسئله می­تواند به صورت زیر فرمول­بندی شود:







در مدل ریاضیاتی پیشنهادی، تابع هدف به حداقل رساندن هزینه کل در زنجیره تأمین برای مسئله طرح SCN تک منبعی، چند محصولی، چندمرحله‌ای است. شامل هزینه­های ثابت سالیانه مربوط به عملکرد واحدهای صنعتی و DCs، هزینه عملکرد سالیانه برای یک DC، هزینه متغیر تولید و توزیع و هزینه­های حمل­ونقل مواد خام از تأمین­کننده به واحد صنعتی، محصول نهایی از واحد صنعتی به DCs و از DCs به مشتریان می­شود. محدودیت (1) اختصاص منحصربه­فرد یک DC به یک مشتری را نشان می­دهد. محدودیت (2) محدودیت ظرفیتی هر DCs را نشان می­دهد. محدودیت (3) تعداد DCs را که قابلیت باز شدن دارند را محدود می­کند. محدودیت (4) و (5) برای رضایت مشتری و تقاضای DC برای همۀ محصولات کاربرد داشتند. محدودیت (7) نیاز به مواد خام برای تولید را نشان می­دهد. محدودیت (8) محدودیت ظرفیتی یک واحد صنعتی را نشان می­دهد. محدودیت (9) محدودیت موجود در کمیت کلی منتقل شده از واحد تولید به مشتریان از طرف DCs را نشان می­دهد، که نمی­تواند از کمیت تولیدی واحد صنعتی فراتر رود. محدودیت (10) محدودیت موجود در تعداد واحدهای صنعتی را نشان می­دهد، واحدهایی که می­توانند باز شوند. محدودیت­های (11)-(13) متغیرهای تصمیم­گیری $z\_{k}$، $p\_{k}$و $y\_{ij}$ را محدود می­کند. محدودیت­های (14)-(16) محدودیت­های مثبتی را بر متغیرهای تصمیم­گیری $b\_{skr}$، $x\_{lk}$و $q\_{ijl}$تحمیل می­کند. مسئله افزایش ظرفیت واحدهای صنعتی NP است و این مسئله افزایش ظرفیت واحد صنعتی، مسئله توزیع و تولید را یکپارچه کرده، به‌طوری‌که مسئله طرح شبکه زنجیره تأمین تک منبعی، چند محصولی، چندمرحله‌ای نیز یک NP سخت است.

**4. روش بهینه­سازی پیشنهادی: روش الهام گرفته از مقاومت بسیار بهینه**

مقاومت بسیار بهینه (HOT) مکانیسمی برای قانون توان است که چشم­انداز فیزیک آماری را با روش­های مهندسی برای ساختن یک سیستم قوی و به هم پیوسته هماهنگ می­کند. HOT اساساً بر اساس نظریه کنترل و قانون قدرت است که در بسیاری از مشکلات از جمله مدل مدیریت آتش­سوزی جنگل، مدل نفوذ، مدل شمع ماسه، سیستم­های بقای سلول­های بیولوژیکی و انتقال فایل اینترنت استفاده می­شود. با توجه به ویژگی‌های مختلف HOT از آن به عنوان یک روش بهینه‌سازی استفاده کرده‌ایم. در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان از HOT در شرایط مختلف برای حل مشکلات مختلف طراحی استفاده کرده­اند.

 **4.1انگیزه**

در سیستم­های پیچیده، اغلب مشاهده می­شود که اندازه رویدادهای محرک از اندازه رویدادهای آغازگر مستقل است (کارلسون و دویل، 1999). در سیستم­های HOT، مشاهده می­کنیم که قوانین توان چگونه در اندازه رویدادها از به حداقل رساندن هزینه­ها در مواجه با مبادله ظاهر می­شوند. HOT چهارچوبی جدید برای درک ابعاد مشخص پیچیدگی سیستم­های طراحی شده یا مهندسی شده است. به خاطر رفتار HOT، از مقاومت بسیار بهینه ناشی از روش بهینه­سازی استفاده کردیم. مسئلۀ مطرح شده در این مقاله، مسئله توزیع زنجیره تأمین چند محصولی، چندمرحله‌ای است. این مسئله به خاطر وجود محدودیت­های ظرفیتی و متغیرهای فراوان، بسیار پیچیده است و حل آن با استفاده از روش­های قطعی دشوار است. بنابراین، از رویکردهای اکتشافی مختلف برای حل این نوع NP سخت و مسئله پیچیده استفاده می­کنیم. بسیاری از الگوریتم­ها در حداقل­های محلی همگرا می­شوند و نتایج رضایت­بخشی به دست نمی­دهند، درحالی­که الگوریتم HOT فضای جستجوی بهتری دارد و در حداقل­های محلی همگرا نمی­شود. بنابراین، در این مقاله از HOT برای به حداقل رساندن هزینه توزیع زنجیره تأمین کلی استفاده می­شود.

**4.2 اطلاعات زمینه­ای**

کارل و دیگران (2001) و کارلسون و دویل (1999، 2000 الف) مکانیسمی را ارائه کردند، که از مکانیسم­های بیولوژیکی و تکنولوژی مهندسی پیشرفته الهام گرفته شده است تا رفتار سیستم­های پیچیده و همچنین پیامد طراحی آنها را بررسی کنند. آنها به این مکانیسم به عنوان مقاومت بسیار بهینه (HOT) اشاره می­کنند. بر مبنای نظریه کنترل و قانون توان است که برای مقابله با مسائل مختلف از جمله مدیریت آتش­سوزی جنگل، مدل نفوذ آتش­سوزی جنگل، سیستم بقای سلول­های بیولوژیکی و مسئله ترافیک انتقال فایل اینترنت به کار می­رود (موریتز و دیگران، 2005). فرض شده که قوانین توان در سیستم­های طبیعی و همچنین مصنوعی کارایی دارند. بررسی آثار باک (1996) نشان داده که مدل­های کمی (مثل نفوذ آتش­سوزی جنگل و توده­های ماسه) در شرایط خود سازماندهی بحرانی (SOC) یا شرایط بحرانی (EOC) بررسی شده­اند. کاربرد طراحی تا تکامل عمدی با انتخاب طبیعی در یک سیستم ایده­ای کلیدی است که بر HOT متمرکز می­باشد، HOT برای تنظیم سیستم به کار می­رود و وضعیتی ساختاریافته و کارآمد با بازدهی بالا (ارزش عینی) منجر می­شود. برای مثال در یک رویداد شکست، آشفتگی­های خارجی محلی نیز در یک سیستم رخ می­دهند. این شکست تعداد ذرات موجود در مدل خوشه متصل را در نواحی معینی از سیستم کاهش می­دهد. مناطق تحت تأثیر رویداد شکست و بروز آشفتگی‌های خارجی با یک رابطه خاص ارائه شده است. این روابط خاص هنگامی‌که به شکل ریاضیاتی ارائه می­شوند، به عنوان قانون توان شناخته می­شوند. قوانین توان از ویژگی­های متداول سیستم­های مختلف پیچیده به هم پیوسته است. فرکانس قطع برق، پدیده آتش­سوزی جنگل، سیستم زنده ماندن سلول­های بیولوژیکی و مشکل ترافیک انتقال فایل اینترنت نمونه­هایی ازاین‌دست است که توزیع قانون توان را دنبال می­کنند و برای نشان دادن مفهوم HOT استفاده می­شوند. از این میان، دو مدل که اغلب توسط کارلسون و دویل (1999) مورد استفاده قرار می­گیرد ، آتش‌سوزی جنگل و نفوذ است.

در ابتدا، برای توصیف مفاهیم کلیدی، چهارچوب HOT برای مدیریت آتش­سوزی جنگل به کار رفت. این چهارچوب برای بهینه­سازی الگوهای مانع اطراف نواحی بسیار حساس توصیف‌شده، به طوری که منطقه سوخته به خاطر رویدادهای تصادفی (آتش) می­تواند به حداقل برسد و در نتیجه بار چوب (ارزش عینی) به حداکثر برسد. علاوه بر این، در نظر بگیرید که جرقه به طور تصادفی در یک سیستم تصادفی کاهش می­یابد که دارای چگالی معادل سیستم طراحی شده است. در اینجا دو مورد به وجود می­آید: اگر جرقه به محل خالی برخورد کند، هیچ چیزی نمی­سوزد. با این حال، در مورد دیگر، درختان داخل خوشه متصل می­سوزند. در آثار پیشین مشاهده شده است که احتمال وقوع رویدادهای بزرگ نسبت به رویدادهای کوچک کمتر است (کارلسون و دویل 1999).

در اصل، HOT مکانیسمی است که به سیستم طراحی شده با وجود محیط نامشخص کمک می­کند و عملکرد بالایی را نشان می­دهد. یک پیکربندی داخلی بسیار ساختار یافته ، غیر عمومی ، غیر متمایز و یک سیستم رفتاری قوی و در عین حال شکننده ، می‌تواند نتیجه طراحی کمی برای یک سیستم پیشرفته باشد. این طرح با هدایت قدم اولیه به سمت سازه‌های پیچیده انجام می‌شود. برای تجزیه‌وتحلیل تفاوت اساسی بین سیستم تصادفی و طراحی شده، مکانیزم جایگزین (HOT) برای قانون توان پیشنهاد شده است که به ویژگی­های زیر از سیستم طراحی شده منتج می­شود.

• کارایی، عملکرد و قدرت بالا در برابر عدم قطعیت¬ها.

• حساسیت به نقض در طراحی و عدم قطعیت¬های پیش¬بینی نشده.

• پیکربندی غیر عمومی، تخصصی و ساختاریافته.

• قانون توان.

بهینه­سازی تابع هدف با توجه به محدودیت­های مشخص به ویژگی­های بالا از سیستم طراحی شده منتج می­شود. برای بهینه­سازی معیار طراحی (عملکرد) در مدل نفوذ، کارلسون و دویل (1999) یک الگوریتم افزایشی محلی را توصیف کردند، که موضوع زیر بخش­ زیر است.

**4.3 قانون توان**

قانون توان نوعی خاص از روابط ریاضیاتی میان دو کمیت است. طبق قانون توان، متغیر تصادفی مثبت X احتمال توزیع دارد $P\_{r}$ دارای توزیع قانون توان است اگر



برای $c>0$ و $β>0$، توزیع قانون توان به بستگی دارد و طبق ($β$) ارزش توان $β$ تغییر می­کند. قانون توان نکته­ای کلیدی از روش بهینه­سازی HOT است. کلوزت و دیگران (2009) توزیع قانون توان را برای داده­های عالی ارائه کردند. زمانی که احتمال اندازه­گیری ارزش خاص برخی از کمیت­ها به توان یک ارزش بستگی دارد، این کمیت رفتار قانون توان را نشان می­دهد.



شکل 2: نمایش جمعیت اولیه شبکه زنجیره تأمین چند محصولی، چندمرحله‌ای

**4.4 تکامل وضعیت HOT (الگوریتم افزایشی محلی)**

به‌طورکلی، بهینه­سازی جهانی همیشه به اندازه کافی برای معرفی طرح به سیستم­های مهندسی و بیولوژیکی کافی نیست. این سیستم­ها با جستجوی تغییرات محلی بهبود یافته در پیکربندی پس از هر مرحله ، وضعیت مفصلی به دست می‌آورند. فنوتیپ در یک سیستم بیولوژیکی مورد استفاده قرار می گیرد که از نظر مفهومی با ژنوتیپ متفاوت است. در یک سیستم مهندسی، وضعیت‌های HOT به وضوح روشن هستند، وضعیت­های HOT به صورت مشخص جدا هستند، زیرا طرح­های خاص عاری از هرگونه رخداد هستند. یک پارامتر طراحی مانند تراکم فنوتیپ فرض می­شود و پیکربندی به دست آمده ژنوتیپ است. بنابراین ژنوتیپ می­تواند با کاربرد طرح انتخاب طبیعی برای پارامتر طراحی در دو مورد بالا، به صورت فنوتیپ تکامل یابد.

علاوه بر این، اگر یک پارامتر طراحی مانند چگالی با استفاده از یک الگوریتم تکاملی بهینه شود، می­توان سیستم را برای دست­یابی به یک حالت خاص ساده کرد. این تکامل شامل تعداد زیادی از تنظیمات مداوم سیستم مربوط به عملکرد خاص در هر مرحله است. در این حالت، سیستم از توزیع قانون توان پیروی می­کند. توزیع احتمال و محدودیت بهینه­سازی دو عنصر اصلی حالت HOT هستند. روش اجرا در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین در بخش زیر ارائه شده است.

**4.5 مدل ریاضیاتی الهام گرفته از HOT**

مدل پیشنهادی الهام گرفته از HOT بر مبنای قانون توان است. طبق مدل HOT این روش انتخاب به معادله قانون توان وابسته است. در این مدل، فرض می­کنیم که احتمال به حداقل رساندن هزینه­ها به جمعیت اولیه بستگی دارد. به جمعیت مربوط به متغیر تصمیم­گیری اجازه دهید Xk، با جمعیت اولیه xk و احتمال Pk باشد. جمعیت اولیه مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین به پارامتر Rk وابسته است. طبق قانون توان



برای مقادیر ثابت می­خواهیم هزینه کلی زنجیره تأمین را به حداقل برسانیم. اگر هزینه زنجیره تأمین کلی



موضوع این محدودیت باشد



که در آن N ثابت است، از معادلات (19)، (20) و (21)، با استفاده از ضریب لاگرانژی، معادله زیر به دست می­آید





شکل 3- نمودار بلوک رویکرد پیشنهادی HOT



از معادله (23) می­بینیم که احتمال انتخاب به جمعیت اولیه بستگی دارد. ما از این معادله به عنوان معادله قانون استفاده می­کنیم. جمعیت اولیه مربوط به این مسئله در شکل 2 نشان داده شده است. فرض کنید که مقدار تناسب جمعیت اولیه fk باشد، پس از معادله (23)



این معادله برای احتمال انتخاب از معادله (24) محاسبه شده است. این معادله قانون توان مربوط به مدل ریاضیاتی پیشنهادی نامیده می­شود.

**4.6 حداقل احتمال انتخاب**

در این روش پیشنهادی، Tp برای انتخاب هر نقطه از جمعیت اولیه تعیین شده است. نقشی کلیدی را در کاهش هزینه کلی شبکه زنجیره تأمین بازی می­کند و بنابراین این رویکرد پیشنهادی را از نظر محاسباتی اقتصادی می­کند. با افزایش Tp زمان محاسباتی کاهش می­یابد؛ با این حال، مقدار به دست آمده از این هزینه ضعیف­تر می­شود. برای مثال، اگر Tp از 5/0 به 6/0 افزایش یابد، زمانی محاسباتی تا 10% کاهش پیدا می­کند، اما راه­حل نهایی بدتر است. علاوه بر این، برای کاهش هزینه زنجیره تأمین، پس از هر معیار PR از زنجیره تأمین نیز افزایش می­یابد. ایده اصلی مربوط به احتمال انتخاب محاسبه یک احتمال بهتر از معادله هزینه برای ایجاد سیستم مطمئن­تر است.

**4.7 معیار توقف**

انتخاب معیار توقف نیز فاکتوری مهم برای یک روش کارآمد است که باید برای توقف این روش پس ارزیابی تابع مناسب به کار رود. موارد زیر دو معیار توقف به کار رفته در این روش پیشنهادی است.

• زمانی که تعداد تکرارها به حداکثر مقدار از پیش تعیین شده رسید، معیار توقف حاصل می¬شود.

• معیار دیگر تحت شرایط مقدار ثابت هزینه است. زمانی که مقدار هزینه تا تعداد مشخصی از تکرارها افزایش

می­یابد، این نشان می­دهد که احتمال بسیار کمی برای به دست آوردن بهبود بیشتر نتایج وجود دارد و بنابراین معیار به دست می­آید.

**4.8 نمودار بلوک از مقاومت بسیار بهینه**

نمودار بلوک شکل 3 مراحل پیشنهادی موجود در رویکرد مقاومت بسیار بهینه (HOT) را نشان می­دهد.

**5. مقایسه با موارد مشابه**

برای بررسی کارآمدی مقاومت بسیار بهینه پیشنهادی از موارد مشابه استفاده می­کنیم. موارد مشابه یک روش جستجوی تصادفی است که توسط کرکپاتریک و دیگران (1983) ارائه شده است. جایارمان و پیرکول (2001) موارد مشابه را برای طرح شبکه توزیع و مسئله مدیریت ارائه کردند. بخش 6 در مورد روش راه­حل رویکرد موارد مشابه بحث می­کند. ما نتایج به دست آمده از طریق روش HOT پیشنهادی و موارد مشابه را با استفاده از مجموعه داده­های یکسان مقایسه می­کنیم. مقایسه این دو الگوریتم مقادیر مختلفی برای تابع تناسب در مجموعه داده­های مشابه به دست می­دهد و بر اساس مقدار متناسب و نمودار همگرایی، کارآمدی HOT را نشان می­دهیم.

**6. موارد مشابه**

روش موارد مشابه بر اساس شبیه­سازی موارد حرارتی ماده جامد است. این روش احتمالی است توسط کرکپاتریک و دیگران (1983) برای محاسبه حداقل تابع هزینه ارائه شده است. جایارمان و پیرکول (2001) از روش موارد مشابه برای مسئله طراحی شبکه توزیع استفاده کرد. این روش در حوزه­های زیادی از مهندسی استفاده شد. با آغاز یک راه­حل آغازی، موارد مشابه راه­حلی جدید را در مجاورِ راه­حل اولیه ایجاد کرد. تغییر ارزش عینی $∆f=f\_{i}-f\_{i+1}$ را محاسبه می­کنیم. در مسئله به حداقل رساندن، اگر این تغییر در تابع هدف منفی باشد، نقطه جدید را به عنوان نقطه آغازی در نظر می­گیریم. اگر D مثبت باشد، از معیار کلان­شهر استفاده می­کنیم که در آن با پذیرش نقطه طراحی، احتمال مشخصی وجود دارد که با $exp⁡[-∆f/T]$ نشان داده می­شود، که در آن T پارامتری است که به عنوان دمای آغازی از آن استفاده می­شود. در موارد مشابه کیفیت راه­حل نهایی تحت تأثیر حدس اولیه نیست (به شکل 4 مراجعه کنید).



شکل 4: نمایش جمعیت اولیه شبکه زنجیره تأمین چند محصولی، چندمرحله‌ای

**6.1 شبه کد موارد مشابه**

**موارد مشابه**

ایجاد جمعیت اولیه Xi

تعیین پارامترهای اولیه (n – تعداد تکرارها، T= آغازی

تکرار (تا انتها)

درحالی­که (iter < iter \_ max)

محاسبه مقدار تناسب fi = f(Xi+1)

تعیین تکرار i =1، چرخه p = 1

ایجاد جمعیت جدید Xi+1 در مجاورت Xi

برای پذیرش Xi+1 یا منع استفاده از معیار کلان­شهر

به­روزرسانی تعداد تکرارها i = i +1

اگر تعداد تکرار i = n باشد

تعداد چرخه­ها را به صورت p = p + 1 به­روزرسانی کنید

Iter ++

کاهش دما

**7. مطالعه تجربی**

مسئله پیشنهادی مسئله طراحی زنجیره تأمین چند مرحله­ای، چند محصولی است. ما مجموعه مسائل مختلفی را در نظر گرفته­ایم و از رویکردهای اکتشافی مختلفی برای حل مسئله پیشنهادی استفاده کرده­ایم این مجموعه داده­ها که به طور تصادفی طبق این مسئله ایجاد کرده­ایم در جدول­های 1-8 نشان داده شده است. محیط­های پارامتری HOT و SA به صورت زیر است. احتمال نهایی Tk که در رویکرد مقاومت بسیار بهینه به کار رفته 855/0 در نظر گرفته شده و مقدار توان $β$ 8/0 گرفته شده است. در موارد مشابه، فاکتور کاهش دما 6/0 است. جدول­های 1 و 2 هزینه حمل­ونقل مواد خام را از تأمین­کننده به واحدهای صنعتی نشان می­دهد و همۀ هزینه­ها، هزینه واحد در محصول واحد هستند. جدول­های 3 و 4 هزینه­های حمل­ونقل هزینه­­های حمل­ونقل را برای محصولات از واحدهای صنعتی به DCs نشان می­دهند. جدول­های 5 و 6 هزینه­های حمل­ونقل برای محصولات از DCs به مشتریان را نشان می­دهند. جدول 7 تقاضای محصول از جانب مشتریان را نشان می­دهد. جدول 8 هزینه تولید محصول در واحد صنعتی را نشان می­دهد. با استفاده از مجموعه داده­ها مقادیر بهینه مختلفی را برای مجموعه داده­های مختلف محاسبه کردیم. برای مقایسه منطقی میان این رویکردها، در همۀ رویکردها جمعیت اولیه را حدود 500 و تعداد نسل­ها را حدود 1000 در نظر می­گیریم.

جدول1: هزینه واحد حمل­ونقل و خرید برای مواد خام 2 از تأمین­کننده تا واحد صنعتی k.



جدول 2: هزینه واحد حمل­ونقل و خرید برای مواد خام 1 از تأمین­کننده تا واحد صنعتی k.



جدول 3: هزینه واحد حمل­ونقل برای محصول 1 از واحد صنعتی k تا DCj.



جدول 4: هزینه واحد حمل­ونقل برای محصول 2 از واحد صنعتی k تا DCj.



جدول 5: هزینه واحد حمل­ونقل برای محصول 1 از DCj به مشتری i.



جدول 6: هزینه واحد حمل­ونقل برای محصول 2 از DCj به مشتری i.



جدول 7: تقاضای محصول k توسط مشتری i.



جدول 8: هزینه تولید محصول 1 در واحد صنعتی k.



**8. نتایج محاسباتی و بحث**

مقاومت بسیار بهینه (HOT) نتایج بهتری نسبت به موارد مشابه دارد. نمودار همگرایی نشان می‌‌دهد که HOT فضایی جستجوی بهتری نسبت به سایر رویکردهای اکتشافی دارد (شکل 5). در حداقل محلی همگرا نمی­شود.جدول­های 9-14 نتایج به دست­آمده را نشان می­دهند. جدول­های 9 و 10 میزان مواد خام تأمین شده از تأمین­کننده به واحدهای صنعتی را نشان می­دهند. جدول­های 11 و 12 میزان محصولات تأمین­شده از واحدهای صنعتی به DCs را نشان می­دهند. جدول­های 13 و 14 میزان محصول تأمین شده از DCs به مشتریان را نشان می­دهند. جدول 15 مقادیر متناسب به دست آمده با استفاده از رویکرد پیشنهادی و موارد مشابه را برای پیکربندی­ها و مجموعه داده­های مختلف نشان می­دهد. می­دانیم که مقادیر متناسب به دست آمده توسط HOT کوچک­تر از مقادیر رویکرد موارد مشابه است. برای بررسی تأثیر احتمال انتخاب در مقادیر متناسب، مقادیر متناسب در احتمالات انتخابی مختلف را محاسبه می­کنیم. جدول 16 مقادیر متناسب حاصل از احتمالات انتخابی مختلف را نشان می­دهد و می­بینیم که افزایش در احتمال انتخاب با کاهش در مقادیر متناسب همراه است. جریان محصول از تأمین­کننده به مشتریان نشان می­دهد که تنها سه واحد صنعتی (P1, P3, P4) و دو DCs (DC2, DC3) در این زمان باز هستند. در این مسئله فرض می­کنیم که مشتریان به یک DCs واحد اختصاص می­یابند، که به وضوح در جدول­های 13 و 14 نشان داده شده است.



شکل 5: نمودار همگرایی روش­هایی پیشنهادی موردمطالعه

جدول 9: مواد خام 1 تأمین­شده از تأمین­کننده به واحد صنعتی



جدول 10: مواد خام 2 تأمین شده از تأمین­کننده به واحد صنعتی



جدول 11: محصول 1 تأمین شده از واحد صنعتی به DC



جدول 12: محصول 2 تأمین شده از واحد صنعتی به DC



جدول 13: محصول 1 تأمین­شده از DC به مشتریان



جدول 14: محصول 2 تأمین­شده از DC به مشتریان



جدول 15: مقادیر بهینه به دست آمده با راه­اندازی الگوریتم­های مختلف



جدول 16: مقادیر بهینه به دست آمده در احتمالات انتخابی مختلف



**9. نتیجه­گیری**

در این مقاله یک روش بهینه­سازی جدید به نام مقاومت بسیار بهینه (HOT) را برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین چند مرحله­ای، چند محصولی ارائه کرده­ایم. هدف این مسئله به حداقل رساندن هزینه توزیع زنجیره تأمین کلی می­باشد. HOT بر مبنای قانون توان و نظریه کنترل است. برای بررسی کارآمدی الگوریتم پیشنهادی ما این نتایج را با نتایج حاصل از موارد مشابه (SA) در مجموعه داده­های یکسان مقایسه کردیم. ما دریافتیم که این الگوریتم پیشنهادی نتایج بهتی نسبت به SA دارد. نمودار همگرایی (شکل 5) نشان می­دهد که HOT در حداقل محل همگرا نمی­شود. HOT به قدرت معادله قانون توان، با $β$ نشان داده می­شود، و همچنین احتمال انتخاب وابسته است. افزایش احتمال انتخاب به کاهش مقدار تناسب و زمان محاسباتی منجر می­­شود. علاوه بر این، HOT می­تواند برای در نظر گرفتن ابعاد واقعی این مسئله مانند محیط پویا و تقاضای تصادفی تغییر کند. در آینده قصد داریم از رویکردهای جدیدی بر مبنای جستجوی تابو یا الگوریتم تقلیدی برای مسئله توزیع زنجیره تأمین چند محصولی استفاده کنیم.

**References**

Altiparmak, F., Gen, M., and Lin, L., 2005. A genetic algorithm for supply chain network design. International Conference on Computer and Industrial Engineering, 51 (1), 111–116.

Altiparmak, F., et al., 2006. A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. Computer and Industrial Engineering, 51(1), 196–215.

 Altiparmak, F., et al., 2009. A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design. Computers and Industrial Engineering, 56 (2), 521–537.

Aytug, H., Khouja, M., and Vergara, F.E., 2003. Use of genetic algorithm to solve production and operations management problems: a review. International Journal of Production Research, 41, 3955–4009.

Bak, P., 1996. How nature works: the science of self-organized criticality, New York: Springer-Verlag.

Beamon, B.M., 1998. Supply chain design and analysis: models and methods. International Journal of Production Economics, 55 (3), 281–294.

Carl, R., Carlson, J.M., and Doyle, J., 2001. Highly optimized tolerance in epidemic models incorporating local optimization and regrowth. Physical Review Letters, 63 (5), 056122.

Carlson, J.M. and Doyle, J., 1999. Highly optimized tolerance: a mechanism for power laws in designed systems. Physical Review Letters, 60 (2), 1412–1427.

 Carlson, J.M. and Doyle, J., 2000a. Highly optimized tolerance: robustness and design in complex system. Physical Review Letters, 84 (11), 2529–2532.

Carlson, J.M. and Doyle, J., 2000b. Power laws, highly optimized tolerance and generalized source coding. Physical Review Letters, 84 (24), 5656–5659.

 Carlson, J.M. and Doyle, J., 2002. Complexity and robustness. PNAS, 99 (1), 2538–2545.

Carlson, J.M., Manning, M., and Doyle, J., 2005. Highly optimized tolerance and power law in dense and sparse resource regimes. Physical Review Letters, 72 (5), 016018.

Carlson, J.M. and Zhou, T., 2000. Dynamics and changing environments in highly optimized tolerance. Physical Review Letters, 62 (3), 3197–3204.

Chan, F.T.S., Chung, S.H., and Wadhwa, S., 2005. A hybrid genetic algorithm for production and distribution. Omega, 33 (4), 345–355.

Chen, C. and Lee, W., 2004. Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices. Computers and Chemical Engineering, 28 (6–7), 1131–1144.

Chopra, S., 2003. Designing the distribution networks in a supply chain. Transportation Research E, 39 (2), 123–140.

 Clauset, A., Shalizi, C. R., and Newman, M. E. J., 2009. Power law distributions in imperial data. SIAM Review, 51 (4), 661–703.

Erenguc, S.S., Simpson, N.C., and Vakharia, A.J., 1999. Integrated production/distribution planning in supply chains: an invited review. European Journal of Operational Research, 115 (2), 219–236.

 Gen, M. and Syarif, A., 2005. Hybrid genetic algorithm for multi-time period production/distribution planning. Computers and Industrial Engineering, 48 (4), 799–809.

Hillier, F.S. and Lieberman, G.J., 2001. Introduction to operations research. New York: McGraw Hill.

 Hongwei, D., et al., 2009. Stochastic multi-objective production-distribution network design using simulation-based optimization. International Journal of Production Research, 47(2), 479–505.

Jang, Y., 2002. A combined model of network designer and production/distribution planning for a supply network. Computers and Industrial Engineering, 43 (1–2), 263–281.

Jawahar, N. and Balaji, A.N., 2007. A genetic algorithm for the two-stage supply chain distribution problem associated with a fixed charge. European Journal of Operation Research, 194 (2), 496–537.

 Jayaraman, V. and Pirkul, H., 2001. Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. European Journal of Operation Research, 133 (2), 394–408.

Jayaraman, V. and Ross, A., 2003. A simulated annealing methodology to distribution network design and management. European Journal of Operational Research, 144 (3), 629–645.

Kannan, G., Haq, N., and Devika, M., 2009. Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimization. International Journal of Production Research, 47 (5), 1175–1200.

Kirkpatrick, S., Gelett, C.D., and Vecchi, M., 1983. Optimization by simulated annealing. Science, 220 (4598), 621–630.

Lin, X. and Bo, Z., 2008. Comparative analysis of blackout data from North America power grids using the highly optimized tolerance model, In: Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 20–24 July, Pittsburgh, PA. New York: IEEE, 1–7.

 Manzini, R. and Gebennini, E., 2008. Optimization models for the dynamic facility location and allocation problem. International Journal of Production Research, 46 (8), 2061–2086.

 Michalewicz, Z., Vignaux, G.A., and Hobbs, M., 1991. A non-standard genetic algorithm for the nonlinear transportation problem. ORSA Journal on Computing, 4 (3), 307–316.

 Moritz, K. M., Boon W.M. and Wintour, E. M., 2005. Glucocortioid programming and adult disease. Cell Tissue Res. 322, 81–88.

Park, Y.B., 2005. An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. International Journal of Production Research, 43 (6), 1205–1224.

Reeves, C., 1995a. A genetic algorithm for flowshop sequencing. Computer & Operation Research, 22 (1), 5–13.

Reeves, C., 1995b. Modern heuristic techniques for combinatorial problems. New York: Wiley.

Riccardo, M. and Gebennini, E., 2008. Optimization models for the dynamic facility location and allocation problem. International Journal of Production Research, 46 (8), 2061–2086.

Robert, C., Carlson, J.M. and Doyle, J., 2001. Highly Optimized Tolerance in epidemic models incorporating local optimization and re growth. Physical Review E, 63, article 056122.

 Sabri, E.H. and Beamon, B.M., 2000. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. Omega, 28 (5), 581–598.

Stubna, M.D. and Flower, J., 2003. An application of the Highly Optimized Tolerance model to electric blackouts. IJBC, 13 (1), 237–242.

 Surana, A., et al., 2005. Supply-chain networks: a complex adaptive system perspective. International Journal of Production Research, 43 (20), 4235–4265.

Syarif, A., Yun, Y., and Gen, M., 2002. Study on multi-stage logistic chain network: a spanning tree-based genetic algorithm approach. Computer and Industrial Engineering, 43 (1–2), 299–314.

Thomas, D.J. and Griffin, P.M., 1996. Coordinated supply chainmanagement. European Journal of Operation Research, 94 (1), 1–15.

 Wojcik, L.A., 2007. A Highly Optimized Tolerance (HOT) inspired model of the large scale systems engineering process. Mclean, VA: The MITRE Corporation.

Xiangning, L. and Zhiquin, B., 2008. Comparative analysis of blackout data from North America power grids using the Highly Optimized Tolerance model. Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, 1–7.

Yang, J.J., et al., 2002. A combined model of network design and production/distribution planning for a supply chain network. Computer and Industrial Engineering, 43 (1–2), 263–281.

 Yeh, W-C., 2006. An efficient memetic algorithm for the multi-stage supply chain network problem. London: Springer, 803–813.

Zhou, G., Min, H., and Gen, M., 2002. The balanced allocation of customers to multiple distribution centers in the supply chain network: A genetic algorithm approach. Computers and Industrial Engineering, 43 (1–2), 252–261.