مدل‌سازی سیستم موجودی قطعات یدکی چندسطحی با پس‌افت و تخفیفات کلی تأمین‌کننده خارجی با رویکرد شبکه

امیرسامان خیرخواه[1]، پروانه سموئی[2*]
دانشگاه بوعلی سینا همدان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۹/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۰۴

چکیده

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های سیستم‌های موجودی چندسطحی، مربوط به قطعات یدکی است. زیرا در دنیای واقعی، تعمیر تجهیزات بسیار اقتصادی‌تر از تعویض آنها می‌باشد. از سوی دیگر این امکان وجود دارد که بتوان با خرید قطعات یدکی، بیشتر از تأمین‌کننده خارجی از تخفیف قیمتی نیز برخوردار شد. از این رو در این مقاله، به یک سیستم موجودی قطعات یدکی چند سطحی با پس‌افت و تخفیف قیمتی از تأمین‌کننده خارجی پرداخته می‌شود و برای مدل‌سازی و حل این مسئله از رویکرد شبکه استفاده می‌گردد. مثال عددی، اثربخشی این الگوریتم را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبکه، جریان مینیمم هزینه، سیستم موجودی چند سطحی، قطعات یدکی، تخفیف کلی

۱- مقدمه

در بسیاری از صنایع، پیوستگی عملیات بسیار ضروری می‌باشد. بنابراین، مدیران و مهندسان تلاش دارند تا بهترین برنامه‌ریزی را برای بهترین تعداد قطعات یدکی ماشین‌آلات داشته باشند. اما از آنجا که قیمت بسیاری از قطعات یدکی بالا می‌باشد، لذا تعمیر اقتصادی‌تر از تعویض آنها خواهد بود[۱]. زمانی که برای قطعه‌ای خرابی پیش می‌آید، قطعه معیوب خارج شده و با یک قطعه جدید آورده شده از انبار، تعویض می‌شود. این قطعه معیوب برای تعمیر به محلی که به‌عنوان "دپو"شناخته می‌شود، فرستاده می‌شود و در نهایت قطعه تعمیر شده در انبار نگه داشته می‌شود تا برای دفعات بعدی که این قطعه مورد نیاز ماشین‌ها می‌باشد، دوباره استفاده شود[۲].

یکی از انواع سیستم‌های موجودی، سیستم‌های چندسطحی است. این نوع سیستم بسیار پیچیده‌تر از سیستم‌های موجودی تک سطحی می‌باشد. چرا که باید محدودیت‌های ارتباطی میان سطوح مختلف نیز در نظر گرفته شود، تا به بهترین سیاست موجودی کل سیستم دست یافت. یک نوع از مهم‌ترین سیستم‌های موجودی چندسطحی در نگهداری و تعمیرات یافت می‌شود، در جایی است که قطعات یدکی می‌توانند به‌طور اقتصادی تعمیر شده و در مکانی معین نگه داشته شوند[۲].

مسائل قطعات یدکی چندسطحی به‌طور گسترده‌ای توسط مؤلفان متعددی مورد بررسی قرار گرفته شده است[۳]. به‌طور مثال گراوز[3] در سال ۱۹۸۵ یک مدل قطعی برای یافتن توزیع حالت ایستای سطح موجوی خالص برای هر سایت ارائه کرد[۴]. در مدل وی فرض می‌شد که شکست‌ها با یک فرآیند پواسون ترکیبی اتفاق می‌افتد و زمان ارسال از دپوی تعمیر به هر سایت قطعی می‌باشد. پس

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا، پست‌الکترونیکی: Kheirkhah@basu.ac.ir
۲*- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه بوعلی سینا، نویسنده پاسخگو، پست‌الکترونیکی: p.samouei@basu.ac.ir، نشانی: همدان، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی

3- Graves

از او، فلدرهوف[1] و کونستانتیس[2] در سال ۱۹۸۶ به توصیف یک مدل تحلیلی پرداختند که برای آماده سازی قطعات یدکی توسعه داده شده بود[۳]. سیستم آنها شامل سه سطح و هر یک دارای نقطه‌ای جهت انبار بود. علاوه بر روش‌های قطعی که برای این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های تقریبی زیادی برای سیستم‌های موجودی چند سطحی ابداع شده است. یکی از این روش‌های تقریبی متعلق به گوپتا[3] و آلبرایت[4] است که یک سیستم دو سطحی موجودی با بخش‌های تعمیرپذیر چند قراردادی را مورد بررسی قرار دادند[۳]. هر یک از چند پایگاه این مقاله، دارای ماکزیمم تعداد ماشین‌های آنلاین مشخص و هر ماشین شامل چند نوع عملکرد بود. در زمان‌های تصادفی این ماشین‌ها با شکست مواجه می‌شدند. در این هنگام نوع عملکرد ماشین مورد شناسایی قرار می‌گرفت و چنانچه قطعه یدکی جهت انجام این کار موجود بود، با قطعه خراب شده تعویض می‌شد. روش آنها قادر بود خیلی از مشکلات را به سرعت حل کند.

در سال ۱۹۹۷ روش تقریبی دیگری توسط دیاز[5] و فو[6] ارائه شد که به تجهیزات تعمیر محدود، زمانی که تابع تعمیر دارای توزیع‌نمایی بود، اشاره داشت. در همان سال آلفردسون[7] یک ساختار ریاضی جهت بهینه‌سازی سیستم‌های موجودی چندسطحی و تعمیرپذیر با در نظر گرفتن مکان قرار گرفتن تجهیزات تعمیر به‌طور هم‌زمان، ارائه کرد[۶]. او بیان نمود که بررسی تعداد قطعات یدکی و تست تجهیزات، برای حمایت از سیستم جهت عملکرد رضایت‌بخش آن مورد نیاز می‌باشد، تا بتوان تعیین نمود که تعمیر در چه زمانی و در کجای سیستم مورد نیاز خواهد بود.

در راستای روش‌هایی برای مدیریت موجودی قطعات می‌توان به مقاله شتوب[8] و سیمون[9] نیز اشاره نمود که در آن سیاستی جهت تعیین نقطه سفارش هر تجهیز استفاده می‌شد[۷]. بنابراین با این پیش‌بینی این امکان فراهم می‌آمد تا بتوان به تعیین نیازمندی‌ها و ارتباط آن با سطح خدمت رسانی راحت‌تر پی برد. آنها برای این منظور از روش آنالیز ABC برای قطعات یدکی نیز بهره بردند.

در سال ۲۰۰۲ اسلپتچنکو[10] و همکاران او به سیستم‌های چندسطحی و چند قراردادی برای قطعات تعمیرپذیر با ظرفیت محدود اشاره داشتند[۸]. هم‌چنین کالچسچمیدت[11] و همکاران او در سال ۲۰۰۳ به توصیف یک سیستم یکپارچه برای مدیریت موجودی تأمین قطعات یدکی در چند سطح یک سیستم زنجیره تأمین پرداختند که هر یک از مشتریان دارای مقدار تقاضاهای مختلفی در این زنجیره بودند[۹]. پس از دو سال، یعنی در سال ۲۰۰۵، اسلپتچنکو[12] و همکارانش، از اولویت‌بندی تعمیرات جهت کاهش میزان قطعات یدکی در شبکه استفاده کردند[۱۰]. برای این کار آنها از مدلی استفاده کردند که دارای چند کلاس و چند خدمت‌دهنده بود.

یکی دیگر از روش‌های مؤثر تقریبی توسط لا[13] و همکاران او در سال ۲۰۰۶ ارائه گردید[۱۱]. آنها یک سیستم موجودی چندسطحی برای قطعات تعمیرپذیر را مورد مطالعه قرار دادند که در آن هزینه‌های تعمیر اصلاحی دارای هزینه‌های بسیار بالا منظور می‌شدند. پس از آنها جیانگ‌شنگ[14] و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به توسعه مدل موجودی برای قطعات یدکی گران‌بها پرداختند[۱۲]. سیستم مورد نظر آنها دارای سه سطح تعمیر و عرضه بود. آنها بدین منظور از روش متریک[15] که تکنیک کنترل بخش‌های تعمیرپذیر در سیستم‌های چندسطحی است، استفاده کردند.

رویکرد دیگری که برای مدل‌سازی و حل مسائل مرتبط با مکان‌یابی تجهیزات، تخصیص موجودی و سرمایه‌گذاری ظرفیت در یک سیستم دو سطحی، تک بخشی با تقاضای تصادفی استفاده می‌شود، توسط راپولد[16] و رو[17] در سال ۲۰۰۹ ارائه گردید[۱۳]. هدف آنها حداقل‌سازی کل هزینه‌های مورد انتظار سیستم بود.

در سال ۲۰۰۹ وان کراندنبورگ[18] و هوتوم[19] یک مدل موجودی قطعات یدکی با در نظر گرفتن انتقالات جانبی

1- Felderhof
2- Gupta
3- Albright
4- Felderhof
5- Diaz
6- Fu
7- Alfredsson
8- Shtub
9- Simon

10- Sleptchenko
11- Kalchschmidt
12- Sleptchenko
13- Lau
14- Jiangsheng
15- METRIC
16- Rappold
17- Roo
18- krandenburg
19- Van Houtum

ارائه کردند[۱۴]. آنها یک سیستم چند بخشی، چند محلی و تک سطحی را با در نظر گرفتن کنترل انبار و محدودیت متوسط زمان انتظار تجمعی لحاظ کردند. هم‌چنین آنها مدل دقیق و هم‌چنین تقریبی سریع جهت ارزیابی ارائه کردند و به توسعه آن به شکل یک روش ابتکاری برای تعیین سطح انبار پرداختند. آنها نشان دادند که تنها تعداد کمی از مکان‌های اصلی برای دست‌یابی به سود بیشتر کافی خواهد بود.

در سال ۲۰۱۰ نیز توپن[1] و همکارانش، یک سیستم موجودی چند بخشی و دو سطحی که انبار مرکزی تحت سیاست (Q; R) عمل می‌کرد و انبارهای محلی سیاست base stock را به کار می‌گرفتند، مورد مطالعه قرار دادند[۱۵]. آنها یک روش حل دقیق برای یافتن سیاست کنترل موجودی که به حداقل‌سازی هزینه‌های نگهداری و سفارش‌دهی تحت محدودیت زمانی برای هر تجهیز توجه می‌داشت، ارائه نمودند.

چندین مقاله وجود دارد که در آن به ارزیابی سیستم موجودی چند سطحی به کمک شبکه‌ها پرداخته شده است. یکی از جدیدترین مقالات این حوزه که در آن از رویکرد شبکه برای مسائلی که در آن شاهد پس‌افت و تأمین‌کننده خارجی می‌باشد، متعلق به لونر و همکاران او در سال ۲۰۱۱ می‌باشد[۱]. در این مقاله آنها از زمان و هزینه قطعی و عرضه و تقاضای بازه‌ای برای مسئله خود بهره برده بودند. آنها ثابت کردند که ویژگی واگنر و ویتین که برای مسائل lot-sizing مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند برای مسئله مدیریت موجودی قطعات یدکی چندسطحی مورد استفاده آنها توسعه داده شود.

مقاله دیگری به پولمن[2] و لونر تعلق دارد که در آن، یک سیستم موجودی با چند سایت عملیاتی در محل‌های متفاوتی قرار دارند و بایستی به تعمیر تجهیزات آن سایت‌ها توجه داشت[۱۶]. در این مسئله، زمانی که بخشی با خرابی مواجه می‌شود، قطعات یدکی مورد نیاز می‌شود. آنها به آنالیز یک سیستم موجودی چند تأمین‌کننده‌ای برای این مسئله پرداختند که در آن یک تأمین‌کننده داخلی شرایط متفاوتی را از منظر هزینه و زمان برای تعمیر قطعه فراهم می‌ساخت و هم‌چنین تأمین‌کننده خارجی می‌توانست قطعات جدیدی را در اختیار آن سازمان قرار دهد. آنها یک مدل شبکه با تقاضای قطعی که در دوره‌های مختلف، متفاوت بود، ارائه کردند و در این راستا از پس‌افت نیز استفاده نمودند. متأسفانه علی‌رغم رویکرد زیبایی که در این مقاله به کار رفته بود، آنها هیچ ظرفیت و محدودیتی را برای مجراهای ورودی، خروجی و حالات تعمیر قرار نداده بودند. چنین چیزی باعث می‌شد ساختار مسئله از مسائل دنیای واقعی که معمولاً محدودیت‌های ظرفیتی در آن وجود دارد، دور بماند. علاوه بر این آنها برای هزینه‌های خرید از تأمین‌کننده خارجی نیز هزینه‌های قطعی و مشخصی قرار داده بودند. در حالی‌که در دنیای رقابتی، امروزه بسیاری از فروشندگان از سیاست‌های تخفیفی استفاده می‌کنند که ضمن فروش بیشتر محصولات خود و به‌دست آوردن سود بیشتر، مشتریان ثابت و وفاداری برای خود جذب نمایند. لذا در مقاله پیش رو سعی شده است این کاستی‌ها پوشش داده شود تا بتوان تخمین بهتری از شرایط دنیای واقعی به‌دست آورد.

ساختار مقاله پیش رو در ادامه آمده است:

در بخش دو به توصیف مسئله موجودی چند سطحی مورد نظر پرداخته می‌شود و به بیان برخی از تعاریف اشاره خواهد شد. در بخش ۳، یک الگوریتم پیشنهادی را برای سیستم موجودی قطعات یدکی چندسطحی با پس‌افت، تخفیف قیمتی و همچنین محدودیت ظرفیت مجراهای ورودی، خروجی و نوع فرآیند تعمیر معرفی کرده و در این راستا از ساختار شبکه نیز بهره می‌برد. نتایج حاصل از حل مثال عددی، در بخش ۴ آورده شده است. در نهایت در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری حاصل از مقاله آورده می‌شود.

۲- ویژگی‌های مسئله

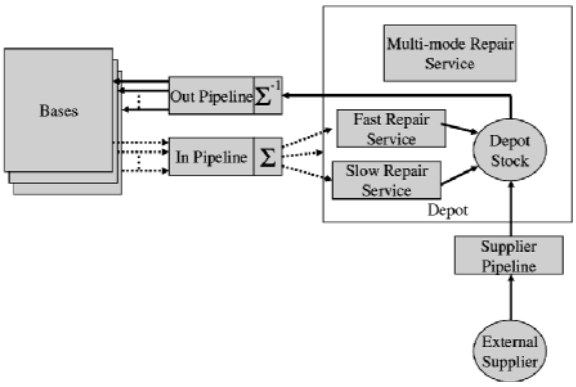
۲-۱- مفروضات و شرایط مسئله

این مقاله سعی دارد به توسعه مقالات [۱] و [۱۶] بپردازد. شرایط این مسئله به شرح زیر است:

در این مسئله تعدادی سایت عملیاتی (پایگاه) و دو شکل تأمین قطعات یدکی (استفاده از تأمین‌کننده خارجی و تعمیرنمودن قطعه) وجود دارند. هنگامی که تقاضایی برای قطعات یدکی در یک پایگاه به وجود می‌آید، چنانچه ذخیره کافی در انبار وجود داشت باشد، قطعه یدکی از مجراهای خروجی دپوی انبار به پایگاه فرستاده می‌شود تا تقاضا را تأمین نماید. در غیر این‌صورت تقاضا دچار پس‌افت خواهد شد. از سوی دیگر، بخش‌های خراب نیز برای تعمیر از طریق

1- Topan
2- Perlman

مجراهای ورودی به دپو فرستاده می‌شوند. در این مقاله فرض می‌شود که دو نوع حالت تعمیر برای قطعات وجود دارد. یک حالت به تعمیر سریع قطعه در t_{min} روز و دیگری به تعمیر کند آن در t_{max} روز می‌پردازد. تعمیر سریع دارای هزینه بیشتری می‌باشد، چرا که در این حالت نیاز به افزایش نیروی انسانی و یا اضافه کاری جهت انجام کار مورد نظر می‌باشد. علاوه بر ان فرض می‌شود که پس از افق برنامه‌ریزی، نباید هیچ تقاضای تأمین نشده‌ای از پایگاه‌ها و یا قطعه‌ای در انبارها باقی بماند. همچنین قطعات تعمیر شده به منزله قطعات نو مجدداً می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، به‌گونه‌ای که می‌تواند تقاضای پایگاه‌ها را تأمین نماید. از سوی دیگر فرض بر این است که هیچ تفاوتی میان قطعات تعمیرشده سریع، کند و یا خریداری شده جدید وجود ندارد. در ضمن محدودیتی جهت ظرفیت هر نوع تعمیر برای هر پایگاه منظور شده است. علاوه بر این تأمین‌کننده خارجی نیز به‌دلیل ترغیب بیشتر خریدارن به محصولات و فروش بیشتر محصولات خود تخفیفی را در ازای خرید بیشتر برای کل قطعات پیشنهاد می‌دهد. قیمت‌های پیشنهادی وی از هزینه تعمیر بالاتر بوده و چنانچه قطعه‌ای خریداری شود به دپوی انبار فرستاده می‌شود.



شکل (۱): ساختار کلی مسئله [۱]

۲-۲- تخفیف کلی

در این شکل از تخفیف، هزینه یک بخش، بستگی به اندازه دسته خریداری شده دارد. به‌طور جزئی‌تر می‌توان گفت فروشنده شرایطی را پیشنهاد می‌دهد که برای دسته‌های کوچک‌تر هزینه خرید واحد قطعه بالاتر و برای دسته‌های بزرگ‌تر هزینه واحد قطعه کمتر خواهد بود. در واقع سیاست تخفیف کلی، سیاستی است که فروشنده خریدار را به خرید بیشتر از خود ترغیب می‌نماید. ساختار این نوع تخفیف مطابق جدول (۱) است.

جدول (۱): ساختار تخفیف در قیمت خرید

دسته تخفیفی	مقدار خرید	قیمت
1	$0 \le X < Q_1$	C_1
2	$Q_1 \le X < Q_2$	C_2
.	.	.
.	.	.
.	.	.
m	$Q_{m-1} \le X < \infty$	C_m

۲-۳- مینیمم جریان هزینه و الگوریتم از بین بردن حلقه‌های منفی

مسئله مینیمم جریان هزینه، تعمیمی از مسئله ماکزیمم جریان است. در این مسئله فرض می‌شود که شبکه $G(V, E)$ با مجموعه گره‌های $V = \{1, \ldots, n\}$ و یال‌های جهت‌دار $E = \{(i, j) \in V \times V\}$ موجود است. علاوه بر این شبکه G دارای دو گره خاص s و t می‌باشد که گره‌های ابتدایی و انتهایی شبکه می‌باشند. همچنین برای هر یال جهت‌دار $(i, j) \in E$ هزینه جریان از گره I به گره j برابر $C(i, j)$ می‌باشد. علاوه بر این هر یال دارای ظرفیت مثبت $u(i, j)$ نیز می‌باشد. مسئله مینیمم جریان هزینه، یافتن ماکزیمم جریان حداقل هزینه از گره ابتدایی به گره انتهایی است[۱۷].

الگوریتم بهینه سازی از بین بردن حلقه‌های منفی الگوریتمی ساده برای حل مسئله مینیمم جریان هزینه می‌باشد که به اختصار الگوریتم از بین بردن حلقه‌ها نیز نامیده می‌شود. این الگوریتم با یک جریان شدنی شروع به‌کار می‌کند و در طی هر تکرار تلاش در راستای بهبود مقدار تابع هدف دارد.

این الگوریتم ابتدا با حل مسئله ماکزیمم جریان، یک جریان‌شدنی را توسعه می‌دهد. سپس در هر تکرار حلقه‌های جهت‌داری که دارای هزینه منفی هستند را در شبکه باقیمانده می‌یابد و جریانی را با توجه به از بین بردن حلقه منفی پیشنهاد می‌دهد. پایان این الگوریتم زمانی است، که هیچ حلقه جهت‌داری با هزینه منفی در شبکه باقیمانده پیدا نشود[۱۸].

۲-۴- پارامترها، متغیرها و مدل ریاضی

پارامترها و متغیرهای زیر در مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

T: افق برنامه‌ریزی

t: یک دوره در افق برنامه‌ریزی $(t=1,2, \ldots, T)$

k: تعداد پایگاه‌ها $(k=1, \ldots, K)$

i: حالت تعمیر($i=1$ (تعمیر سریع) و $i=2$ (تعمیر کند))

$R_t(k)$: تعداد کالاهای سالم مورد نیاز در روز t برای پایگاه k

$F_t(k)$: جریان ورودی (عرضه) آیتم‌های خراب در روز t برای پایگاه k

c_1: هزینه انتقال یک بخش

c_2: هزینه توزیع یک بخش

c_3: هزینه تعمیر سریع یک بخش

c_4: هزینه تعمیر کند یک بخش

c_{5j}: هزینه خرید یک آیتم جدید تحت دسته تخفیفی j

c_6: هزینه نگهداری یک بخش در دوره

c_7: هزینه جریمه دیرکرد

T_1: مدت زمان انتقال در مجراهای ورودی

T_2: مدت زمان انتقال در مجراهای خروجی

T_3: مدت زمان تحویل کالا از تأمین‌کننده خارجی به دپو

T_4: مدت زمان تعمیر سریع

T_5: مدت زمان تعمیر کند

a_j: حد پایین دسته تخفیف j

b_j: حد بالای دسته تخفیف j

$0\leq q_t(k)$: تعداد بخش‌های خراب فرستاده شده از پایگاه k در روز t

$0\leq l_t(k)$: تعداد بخش‌های خراب ترک شده از پایگاه k در روز t

$0\leq W_t(k)$: جریان بخش‌های خراب رسیده به دپو از پایگاه k در روز t

$0\leq DS_t$: دپو و انبار کالاهای خوب در روز t

$0\leq x_t$ $(0\leq y_t)$: تعداد بخش‌های فرستاده شده برای تعمیر سریع (کند) در روز t

$0\leq X_t$: تعداد بخش‌های تعمیر شده با سرویس تعمیر سریع در روز t

$0\leq Y_t$: تعداد بخش‌های تعمیر شده با سرویس تعمیر کند در روز t

$0\leq U_t$: تعداد بخش‌های خریداری شده از تأمین‌کننده خارجی در روز t

$0\leq u_t$: تعداد بخش‌های سفارش داده شده به تأمین‌کننده خارجی در روز t

$0\leq S_t$: تعداد بخش‌های خوب فرستاده شده از دپو در روز t

$0\leq z_t$: تعداد بخش‌های خوب فرستاده شده از دپو به پایگاه k در روز t

$0\leq Z_t(k)$: تعداد بخش‌های خوب رسیده به پایگاه k در روز t

$0\leq BO_t(k)$: تعداد بخش‌های دارای پس‌افت پایگاه k در روز t

$cap_{in}(k)$: ظرفیت مجرای ورودی برای پایگاه k

$cap_{out}(k)$: ظرفیت مجرای خروجی برای پایگاه k

$cap_{fr}(k)$: ظرفیت تعمیر سریع برای پایگاه k

$cap_{sr}(k)$: ظرفیت تعمیر کند برای پایگاه k

M: یک عدد مثبت خیلی بزرگ

مدل ریاضی این مسئله با استفاده از شبکه‌ها در زیر آمده است:

$$\text{Min } Z = c_1\sum_t\sum_k\left(q_t(k)+Z_t(k)\right) + c_2\sum_t\sum_k\left(W_t(k)+z_t(k)\right) + c_3\sum_t y_t + c_4\sum_t x_t + \sum_t\left(\sum_{j=1}^{m} c_{5j}p_j\right)u_t + c_6\sum_t Ds_t + c_7\sum_t\sum_k\left(BO_t(k)\right)$$

$$F_t(k) + l_{t-1}(k) = q_t(k) + l_t(k) \quad (1)$$

$$W_t(k) = q_{t-T_1} \quad (2)$$

$$\sum_k W_t(k) = x_t(k)+y_t(k) \quad (3)$$

$$X_t(k) = x_{t-T_4} \quad (4)$$

$$Y_t(k) = y_{t-T_5} \quad (5)$$

$$U_t = u_{t-T_3} \quad (6)$$

$$X_t + Y_t + U_t + DS_{t-1} = DS_t + S_t \quad (7)$$

$$S_t = \sum_k z_t(k) \quad (8)$$

$$Z_{t+m}(k) = z_t(k) \quad (9)$$

$$Z_t(k) + BO_t(k) = R_t(k) + BO_{t-1}(k) \quad (10)$$

$$q_t(k) \leq cap_{in}(k) \quad (11)$$

$$x_t(k) \leq cap_{fr}(k) \quad (12)$$

$$y_t(k) \leq cap_{sr}(k) \quad (13)$$

$$z_t(k) \leq cap_{out}(k) \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{m} p_j = 1 \quad (15)$$

$$-M(1-p_j) + a_j \leq u_t \leq b_j + M(1-p_j) \qquad j = 1, \ldots, m \quad (16)$$

$$p_j \in \{0,1\}$$

در مدل فوق هدف حداقل‌سازی کل هزینه‌های حمل و نقل، توزیع، تعمیر، نگهداری، خرید و پس‌افت بخش‌ها تحت افق برنامه‌ریزی و با توجه به مقدار تخفیفی است که تأمین‌کننده خارجی به کل محصولات در ازای فروش بیشتر به ما پرداخت می‌نماید، می‌باشد.

در این مدل، محدودیت ۱ بالانس بخش‌های خراب شده در هر پایگاه را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۲ و ۹ به ترتیب، به بخش‌های حمل شده خراب و سالم در مجراهای ورودی و خروجی تعلق دارد. محدودیت ۳ به یکپارچه‌کردن و توزیع آیتم‌های خراب از پایگاه‌های مختلف اشاره دارد. تعداد آیتم‌های خراب ورودی به دپو از پایگاه‌های مختلف در روز t برای تعمیر سریع و یا کند در روز t توزیع می‌شوند. محدودیت‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده تعمیر بخش‌های خراب و ارتباط آنها با آیتم‌های خوب می‌باشد.

محدودیت۷ بالانس دپوی انبار را نشان می‌دهد. محدودیت ۸ نیز به توزیع بخش‌های خوب از دپو و از طریق مجراهای خروجی به پایگاه‌های مختلف اشاره دارد. به‌گونه‌ای که تعداد کل بخش‌های فرستاده شده از دپو در روز t برابر با مجموع بخش‌های $z_t(k)$ فرستاده شده از مجراهای خروجی برای پایگاه‌ها می‌باشد. محدودیت ۱۰ نیز نشان‌دهنده بالانس بخش‌های خوب می‌باشد. محدودیت‌های (11)، (12)، (13) و (14) نیز مربوط به ظرفیت مجراهای ورودی، خروجی، تعمیر سریع و کند می‌باشند. در نهایت محدودیت‌های (15) و (16) نیز به تخفیف کلی خرید از تأمین‌کننده خارجی اشاره دارد.

۳- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی ارائه‌شده می‌تواند برای حل مسائل سیستم‌های موجودی چند سطحی قطعات یدکی با پس‌افت، تخفیف کلی خرید از تأمین‌کننده خارجی و محدودیت ظرفیت مجراهای ورودی، خروجی و نوع تعمیر به کمک رویکرد شبکه قابلیت کاربرد داشته باشد. این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

a. شبکه‌ای به شکل زیر تشکیل دهید:

(a.1). برای هر روز t، $t=1,\ldots,T$ عرضه‌ها و تقاضاهای پایگاه‌ها را مشخص کنید. در کل KT گره ابتدایی و KT گره انتهایی وجود خواهد داشت.

(a.2). برای هر روز t، $t=1,\ldots,T$، گره‌هایی مجزا را برای نشان‌دادن دپو، تأمین‌کننده خارجی و مجراهای ورودی و خروجی مشخص کنید.

(a.3). برای هر جفت گره (به جز گره‌های مربوط به تأمین‌کننده خارجی)، چنانچه جریانی وجود دارد، کمانی را در نظر بگیرید.

(a.4). با توجه به تعداد دسته‌های تخفیفی تأمین‌کننده خارجی، کمان‌هایی میان گره‌های مربوط به تأمین‌کننده خارجی و دپوی انبار ترسیم کنید.

(a.5). هزینه‌های هر کمان را به آن کمان تخصیص دهید.

(a.6). جریان بخش‌هایی که دارای پس‌افت هستند از پایین به بالای ساختار شبکه و جریان کالاهایی که ذخیره می‌شوند از بالا به پایین در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به افق برنامه‌ریزی به طور کامل واضح است که نیازی به در نظر گرفتن کمان‌هایی میان پایگاه‌ها به دپوی تعمیر و همچنین از تأمین‌کننده خارجی به دپوی انبار در روزهای مشخص نیست.

b. بهینه‌سازی

(b.1). به چه طریق هر پایگاه در هر دوره با استفاده از روش شبکه عرضه و تقاضا، ماکزیمم جریانی شدنی را از پایگاه‌ها به دپوی انبار مطابق الگوریتم فورد[1] و رفولکرسون[2] به‌دست می‌آورد[۱۹].

(b.2). با توجه به الگوریتم واگنر[3] و ویتین[4]، تخفیف، قیمت فروش و مقدار خرید را از تأمین‌کننده خارجی تعیین نمایید[۲۰].

(b.3). ماکزیمم جریان شبکه را بر اساس عرضه و تقاضای هر پایگاه در هر دوره از دپوی انبار تا پایگاه‌ها به دست آورید.

(b.4). شبکه باقیمانده را ایجاد کنید.

(b.5). الگوریتم از بین بردن حلقه‌های منفی را به‌کار گیرید. چنانچه حداقل یک شبکه با حلقه منفی وجود دارد، به مرحله (b.1) بازگردید. در غیر این‌صورت توقف نمایید. (برای شناسایی حلقه‌های منفی می‌توان از الگوریتم استاندارد بلمن و فورد نیز کمک گرفت).

1- Ford
2- Fulkerson
3- Wagner
4- Whitin

۴- مثال عددی

روش پیشنهادی در این مقاله به کمک مسئله‌ای که در منبع [۱۹] (پرلمن و لونر) بدان اشاره شده بود، مورد ارزیابی قرار گرفته است. اما با توجه به موقعیت و شرایط مسئله، تغییراتی جزیی برای آن ایجاد شده است. در این مسئله ۲ پایگاه برای یک افق برنامه‌ریزی شش روزه مورد مطالعه قرار گرفته است. عرضه و تقاضای روزانه پایگاه‌ها به شرح زیر می‌باشد.

Rt(1)=Ft(1)=(5, 6, 7, 8, 7, 9)
Rt(2)=Ft(2)=(6, 6, 7, 10, 8, 5)

علاوه بر این در ابتدای کار در انبار ۱۵ قطعه یدک موجود است که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. جدول (۲) اطلاعات زمانی، جدول (۳) پارامترهای هزینه و جدول (۴) نیز دسته‌های تخفیفی این مسئله را نشان می‌دهند. علاوه بر این، جدول (۵) بیانگر ظرفیت مجراهای ورودی، خروجی و همچنین حالات تعمیر می‌باشد. هدف از این مسئله نیز تعیین تعداد قطعات فرستاده شده برای تعمیر کند، سریع و یا مقدار خرید از تأمین‌کننده خارجی است به‌گونه‌ای که کل هزینه‌های موجود حداقل گردد.

جدول (۲): پارامترهای زمانی

پارامتر	مدت زمان(روز)
زمان صرف شده در مجراهای ورودی	T1=1
زمان صرف شده در مجراهای خروجی	T2=1
مدت تحویل از تأمین‌کننده خارجی به دپو	T3=1
مدت زمان تعمیر سریع	T4=2
مدت زمان تعمیر کند	T5=3

جدول (۳): داده‌های مربوط به هزینه

پارامتر	مقدار
هزینه حمل و نقل	c1=$0.05
هزینه توزیع	c2=$0
هزینه تعمیر سریع	c3=$15
هزینه تعمیر کند	c4=$10
هزینه نگهداری موجودی	c6=$0.5
هزینه پس‌افت	c7=$40

جدول (۴): هزینه‌های خرید با توجه به دسته تخفیفی

دسته تخفیف	مقدار خرید	هزینه خرید
1	$0 \leq X < 10$	25
2	$10 \leq X < 20$	22
3	$20 \leq X$	20

جدول (۵): داده‌های مربوط به ظرفیت

بخش	ظرفیت
مجرای ورودی پایگاه۱	۱۰
مجرای ورودی پایگاه۲	۱۰
تعمیر سریع	۲۰
تعمیر کند	۱۵

ساختار شبکه‌ای این مثال در شکل (۲) آمده است.

این شبکه می‌تواند ساده‌تر از شبکه داده شده شود.

مطابق مدت زمان میان دپوی انبار و پایگاه‌ها (۱ روز) قطعات یدکی نمی‌توانند به روز شش برسند. لذا کمان میان گره ۲۳ و ۱۸ می‌تواند حذف شود. به‌علاوه گره ۲۳ در این صورت یک گره ایزوله خواهد شد، که به راحتی می‌تواند نادیده گرفته شود. علاوه بر این کمان‌های (18, Σ)، (18, Σ-1)، (17, 18)، (5, Σ)، (6, Σ)، (7, Σ)، (8, Σ) و (9, Σ) قابلیت حذف شدن خواهند داشت. با این کارها به شبکه زیر برخورد خواهد شد که به‌دلیل ساختار کوچک‌تر به محاسبات کمتری نیز نیاز خواهد داشت.

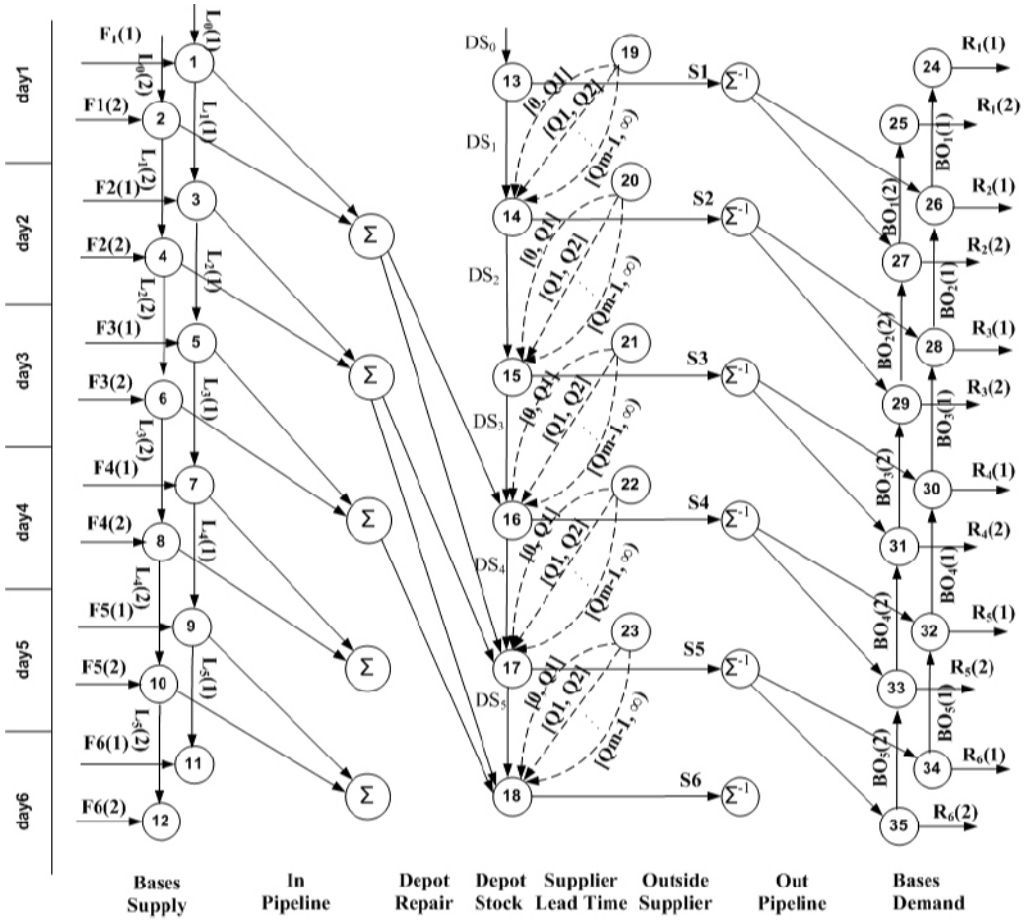
نیاز است براساس عرضه‌ها و تقاضاهای دو پایگاه در هر دوره جریانی‌شدنی برای ماکزیمم آن، دست یافت. شکل (۴) این مطلب را بیان می‌کند.

در این حالت هزینه کل برابر با ۲۲۴۴/۵ دلار خواهد شد.

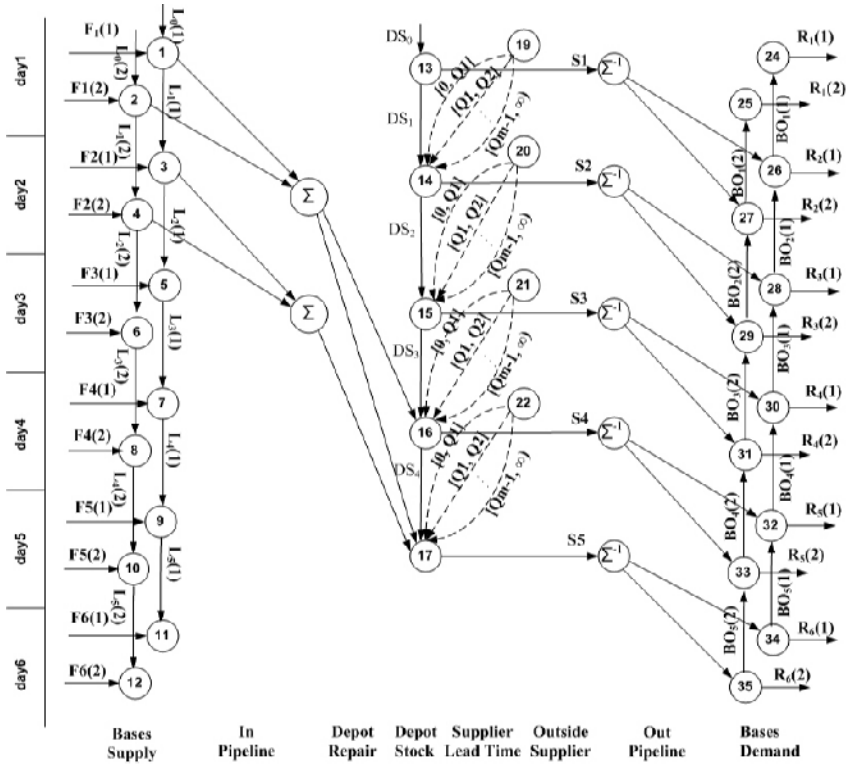
واضح است چنانچه باقیمانده شبکه ترسیم شود، یک چرخه منفی وجود دارد که می‌تواند تغییر کند. این چرخه منفی به تنهایی در شکل (۵) نشان داده شده است.

طبق الگوریتم، از بین بردن حلقه‌های منفی، چنانچه اولین و دومین پارامتر روی کمان، به ترتیب، نشان‌دهنده هزینه و ظرفیت باقیمانده باشند، مقدار این چرخه برابر با (۵,۵- = ۵/. - ۱۰ + ۱۵-) خواهد بود. هم‌چنین حداقل ظرفیت باقیمانده دو خواهد شد.

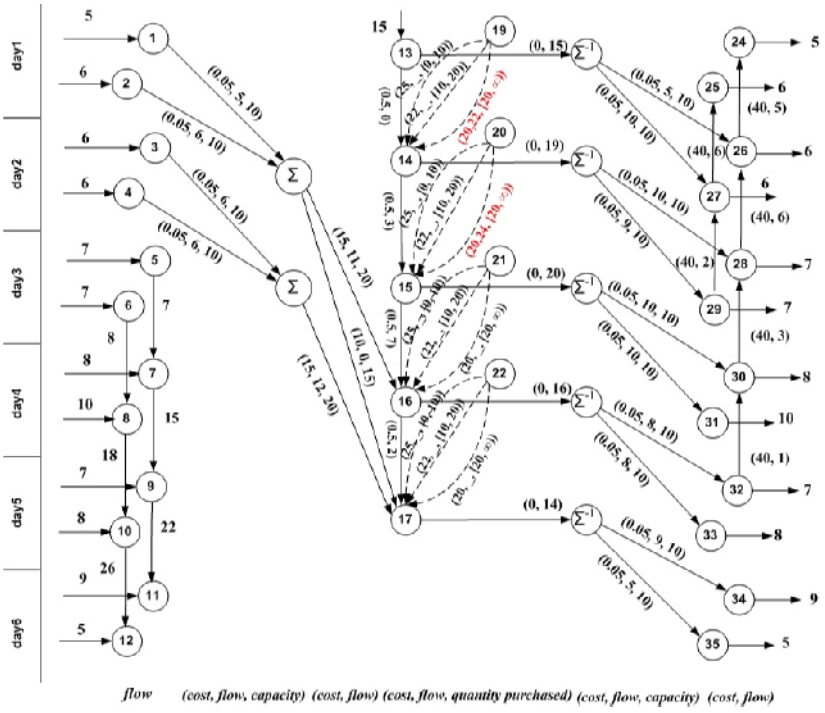
بنابراین نیاز خواهد بود که این مرحله از الگوریتم تکرار شود. با این کار، شبکه بهینه به شکل (۶) خواهد بود.



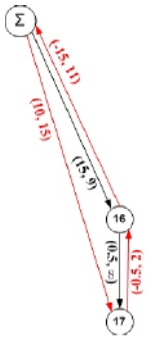
شکل (۲): ساختار شبکه



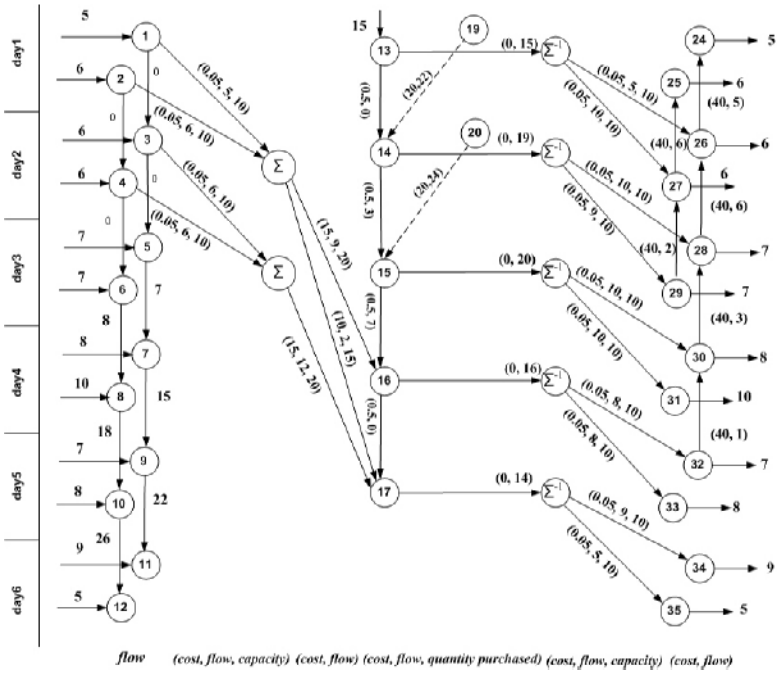
شکل (۳): ساختار شبکه اصلاح شده



شکل (۴): یک شبکه شدنی



شکل (۵): یک چرخه منفی



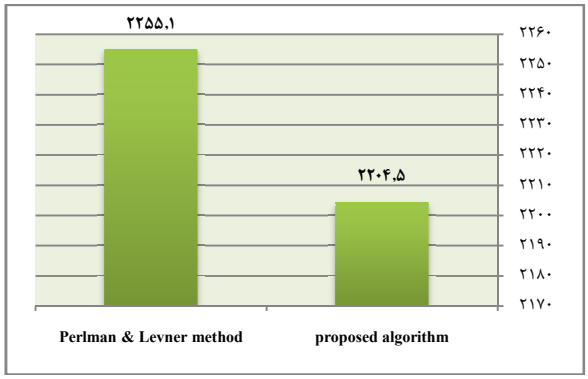
شکل (۶): شبکه بهینه

جدول (۶): حل بهینه

روز	تعداد بخش‌های خریداری شده از تأمین‌کننده خارجی	تعداد بخش‌های خراب فرستاده شده برای تعمیر کند	تعداد بخش‌های خراب فرستاده شده برای تعمیر سریع
۱	۲۲	۰	۰
۲	۲۴	۲	۹
۳	۰	۰	۱۲
۴	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰
۶	۰	۰	۰

واضح است که حداقل هزینه برابر ۲۲۰۴/۵ دلار خواهد شد. که این مقدار از هزینه مرحله پیش کمتر می‌باشد. مقدار بهینه متغیرها نیز برابر جدول (۶) خواهند بود.

چنانچه نتایج حاصل از این مقاله را با نتایج پرلمن و لونر در مقاله [۱۶] که در آن تخفیف قیمت و محدودیت‌های ظرفیت مجراهای ورودی، خروجی و حالت تعمیر مقایسه کنید، درخواهیم یافت که روش ارائه‌شده می‌تواند بهتر از روش آنها عمل کند. شکل (۷) چنین چیزی را نشان می‌دهد:



شکل (۷): مقایسه دو روش

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به پیشنهاد و روشی برای سیستم‌های موجودی چندسطحی قطعات یدکی با وجود پس‌افت و تخفیف کلی در خرید قطعات از تأمین‌کننده خارجی پرداخته شده و با توجه به محدودیت‌های ظرفیت مجراهای ورودی، خروجی و حالات تعمیر به کمک رویکرد شبکه اشاره شده است. برای این کار در ابتدا، ساختار شبکه را براساس مدل ریاضی آن ایجاد کرده و پس از آن به حذف کمان‌ها و گره‌هایی که به حل ساده‌تر شبکه کمک می‌نمود، توجه شده است. برای حل مسئله نیز از روش‌های ماکزیمم جریان شبکه، الگوریتم حذف حلقه‌های منفی و هم‌چنین الگوریتم واگنر ویتین استفاده گردیده است. استفاده از این روش‌ها ساختار خوبی برای الگوریتم مورد استفاده مهیا می‌کند. علاوه بر این استفاده از الگوریتم واگنر ویتین باعث می‌شود که به‌طور ساده‌تری بتوان دسته تخفیفی را که بهترین شرایط را برای مسئله فراهم می‌ساخت پیدا کرد. این مقاله اثربخشی روش خود را با مثال و نتایجی که از مقاله پرلمن و لونر [۱۶] به‌دست آمده بود مورد کاوش و مقایسه قرار داده است.

برای تحقیقات آتی می‌توان پیشنهاد داد که به بررسی ظرفیت دپوی انبار و یا هزینه غیرخطی تعمیرات پرداخت. علاوه بر این بررسی زمان‌های تعمیر فازی می‌تواند به‌عنوان یک گزینه خوب برای تحقیقات مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

[1] Levner, E., Perlman, Y., Cheng, T.C.E., Levner, I., "***A Network Approach To Modeling The Multi-Echelon Spare-Part Inventory System With Back Orders And Interval-Valued Demand***", Int. J. Production Economics 132, 43–51, 2011.

[2] Díaz, A, Fu, M. C., "***Models For Multi-Echelon Repairable Item Inventory Systems with Limited Repair Capacity***", European Journal Of Operational Research 97, 480-492, 1997.

[3] Felderhof, J.P.K., Konstantis, G., "***A Three Echelon Spare Parts Provisioning Model***", European Journal Of Operational Research 24, 118-122, 1986.

[4] Graves, S. C., "***A Multi-Echelon Inventory Model for A Repairable Item with One-For-One Replenishment***", Management Science Vol. 31, No. 10, 1247-1256, 1985.

[5] Gupta, A., Albright S. C., "***Steady-State Approximations For A Multi Echelon Multi-Indentured Repairable-Item Inventory System***", European Journal Of Operational Research 62, 340-353, 1992.

[6] Alfredsson, P., "***Optimization Of Multi-Echelon Repairable Item Inventory Systems With Simultaneous Location Of Repair Facilities***", European Journal Of Operational Research 99, 584-595, 1997.

[7] Shtub, A., Simon, M., "***Determination Of Reorder Points For Spare Parts In A Two-Echelon Inventory System: The Case Of Non Identical Maintenance Facilities***", European Journal Of Operational Research 73, 458-464, 1994.

[8] Sleptchenko, A., Heijden, M.C., A. Harten, A., "***Effects of Finite Repair Capacity In Multi-Echelon, Multi-Indenture Service Part Supply Systems***", Int. J. Production Economics 79, 209–230, 2002.

[9] Kalchschmidt, M., Zotteri, G., Verganti, R., "***Inventory Management In A Multi-Echelon Spare Parts Supply Chain***", Int. J. Production Economics 81–82, 397–413, 2003.

[10] Sleptchenko. A., Van Der Heijden M.C., Van Harten, A., "***Using Repair Priorities To Reduce Stock Investment In Spare Part Networks***", European Journal Of Operational Research 163 (2005) 733–750, 2005.

[11] Lau, H. C., Song, H., See, C. T., Cheng, S. Y., "***Evaluation Of Time-Varying Availability In Multi-Echelon Spare Parts Systems With Passivation***", European Journal Of Operational Research 170, 91–105, 2006.

[12] Jiangsheng, S., Sujian, L., Fanggeng, Z., Lv Yanmei, L., "***Research on The Multi-Echelon Inventory Model Of Weapon Equipment Repairable Valuable Spare Parts***", Automation And Logistics, 2007 IEEE International Conference, 662 – 665, 2007.

[13] Rappold, J. A., Roo, B. D. V., "***Designing Multi-Echelon Service Parts Networks with Finite Repair Capacity***", European Journal Of Operational Research 199, 781–792, 2009.

[14] Kranenburg, A.A., Van Houtum, G.J., "***A New Partial Pooling Structure For Spare Parts Networks***", European Journal Of Operational Research 199, 908–921, 2009.

[15] Topan, E., Bayndir, Z. P., Tan, T., "***An Exact Solution Procedure For Multi-Item Two-Echelon Spare Parts Inventory Control Problem With Batch Ordering In The Central Warehouse***", Operations Research Letters 38, 454_461, 2010.

[16] Perlman, Y., Levner, I., "***Modeling Multi-Echelon Multi-Supplier Repairable Inventory Systems with Backorders***", J. Service Science & Management, 3, 440-448, 2010.

[17] Liu, J., "***Algorithms for Minimum-Cost Flows***", Computer Science Department, the University Of Western Ontario, 2003.

[18] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti, And James B. Orlin., Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications, Prentice-Hall, Inc, 1993.

[19] Ford, L.R., Fulkerson, D.R., "***Flows In Networks***", Princeton University Press, Princeton, N.J, 1962.

[20] Wagner, H. M., Whitin, T. M., "***Dynamic Version Of The Economic Lot Size Model***", Management Science Vol. 50, No. 12 Supplement, 1770-1774, 2004.

[21] Al-Rifai, M. H., Rossetti, M. D., "***An Efficient Heuristic Optimization Algorithm for A Two-Echelon (R, Q) Inventory System***", Int. J. Production Economics 109, 195–213, 2007.

[22] Díaz, A., Fu, M. C., "***Multi-Echelon Models For Repairable Items: A Review***", Working Paper, University of Maryland, Maryland, 1995.

[23] Edmonds, J., Karp, R., "***Theoretical Improvements In Algorithmic Efficiency For Network Flow Problems***", Journal Of ACM, 248-264, 1972.

[24] Garg, A., Deshmukh, S.G., "***Multi-Echelon Repair Inventory Systems: Select Issues in Modular Electronic Equipment***", Defence Science Journal, Vol. 60, No. 5, 514-524, 2010.

[25] Sasikumar, P., Kannan, G., & Noorul Haq, A., "***A Multi-Echelon Reverse Logistics Network Design for Product Recovery-A Case of Truck Tire Remanufacturing***", International Journal of Advanced Manufacturing Technology 49, 1223–1234, 2010.