International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2016)
December 2016, Volume 27, Number 4
pp. 547 - 562

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

A Stochastic Dynamic Programming for Production Planning of Processes Industries

Mohammad Saber Fallah Nezhad*, Mohammad Mehdi Lotfi & Ehsan Shahin

Mohammad Saber Fallah Nezhad *Department of Industrial Engineering, Yazd University,*
Mohammad Mehdi Lotfi *Department of Industrial Engineering, Yazd University,*
Ehsan Shahin *Department of Industrial Engineering, Yazd University,*

Keywords

Process industry,
Network models,
Dynamic programming,
Stochastic dynamic programming

ABSTRACT

In this paper, a production planning of process industries is presented in a mathematical framework of network. The mathematical framework is consisting of a set of multiple manufacturing operation units with a continuous network of material flows between the units. Recent approaches of stochastic programming are not considering possible changes in parameters over time, so that this defect has caused this approach to be inflexible in industrial environments. The purpose of this paper is to develop an approach to surmount the mentioned problem. Accordingly, an integer linear programming is designed with the objective of minimizing the costs of total production, inventory holding, and deviation of the standard output (yield) per unit. Since the output units changes are considered based on stochastic variables, the Markov processes in discrete-time is used over the time horizon. Finally, a numerical example is presented to justify the credibility of model. The results show that the proposed production planning by stochastic dynamic program is five percent closer to practical results in comparison with stochastic programming approach.

© 2016 IUST Publication, IJIEPM Vol. 27, No. 4, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۴، جلـــد ۲۷، زمستان ۱۳۹۵
صفحـــه ۵۶۲ -۵۴۸

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید
دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

یک رویکرد برنامه‌ریزی پویای احتمالی در برنامه‌ریزی تولید صنایع فرآیندی

محمد صابر فلاح‌نژاد* ، **محمد مهدی لطفی و احسان شاهین**

کلمات کلیدی

صنعت فرآیندی،
مدل شبکه‌ای،
برنامه ریزی پویا،
فرآیندهای پویای احتمالی

چکیده:

در این مقاله برنامه‌ریزی تولید صنایع فرآیندی در چارچوب مدل ریاضی شبکه‌ای شامل مجموعه‌ای از چندین واحد عملیاتی ارائه شده است. رویکردهای اخیر برنامه‌ریزی احتمالی، شامل احتمال تغییرات پارامترها در طول زمان نشده و این ضعف باعث غیرکاربردی شدن این رویکرد در عمل، بیان شده است. هدف اصلی این مقاله ارایه رویکردی است که بتواند بر چالش مطرح شده، فائق آید. بر این اساس، یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با هدف کمینه سازی مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری موجودی و انحراف از بازده استاندارد، طراحی شده است. از آنجا که تغییرات میزان خروجی واحدها در قالب متغیرهای احتمالی در افق زمان در نظر گرفته شده، روش فرآیند مارکوف گسسته-زمان به کار رفته است. یک نمونه عددی بمنظور سنجش اعتبار مدل پیشنهادی، ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برنامه تولید ارائه شده توسط برنامه‌ریزی پویای احتمالی پیشنهادی نسبت به رویکرد اخیر (برنامه‌ریزی احتمالی)، پنج درصد به واقعیت نزدیکتر است.

۱. مقدمه

صنایع فرآیندی بر اساس پیوسته بودن جریان مواد شناخته می-شوند؛ صنعت‌هایی همچون پتروپالایش‌ها و پتروشیمی۱ و صنایع شیمیایی و سیمان۲، کود شیمیایی۳، صنایع دارویی، لاستیک و کائوچو۴و کاغذسازی و تولید فلزات و صنایع غذایی۵ در این حوزه قرار می‌گیرند[۱].حوزه برنامه‌ریزی ریزی تولید در صنایع فرآیندی امری نوظهور نیست، به عنوان مثال مطالعه تاثیر هزینه‌های مصرف انرژی بر میزان تولید در صنعت فولاد[۲]، برنامه‌ریزی ظرفیت تولید در کارخانه‌های شیشه‌سازی و پتروشیمی‌ها و فرآیند تولید کاغذ [۳]، رویکرد برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی در صنعت دارو۶ [۴]، تنها نمونه اندکی از مطالعه پژوهشگران در این حوزه است.

امروزه صنایع بزرگ فرآیندی دریافته‌اند که هزینه های اصلی خود را کنترل و کاهش دهند، چرا که عدم توجه به این هزینه‌ها ادامه حیات این صنایع را به خطر می‌اندازد.

از طرفی مدیریت هزینه‌های جانبی که در اولویت دوم قرار دارد، می‌تواند برای این گونه صنایع نسبت به دیگران مزیت رقابتی ایجاد کند.

برای این منظور حوزه برنامه‌ریزی ظرفیت تولید و زمانبندی تولید جزئی از فرآیند تصمیم‌گیری در بسیاری از صنایع فرآیندی محسوب می شوند که نقش مهمی را در برآورده‌سازی نیازهای مشتریان و ارتقای سطح خدمتدهی به مشتریان ایفا می‌نمایند. از آنجائیکه این دو فرآیند در دو سطح متفاوت عمل می‌نمایند (برنامه‌ریزی ظرفیت در سطح تاکتیکی و زمانبندی تولید در سطح عملیاتی)، لذا معمولاً تصمیمات مربوط به این دو حیطه نیز

تاریخ وصول:۹۳/۶/۲۷
تاریخ تصویب:۹۴/۲/۳۰

احسان شاهین، کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یزد، Ehsan.Shahin09@gmail.com
محمد مهدی لطفی، استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یزد،Lotfi@yazd.ac.ir
***نویسنده مسئول مقاله :محمد صابر فلاح نژاد** ، دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یزد،Fallahnezhad@yazd.ac.ir

مستقلاً و جدای از هم اتخاذ می‌شود. در چنین شرایطی شدنی بودن تخصیص ظرفیت انجام شده در سطح تاکتیکی، زمانی که برنامه بصورت عملیاتی است، به عنوان یکی از چالش‌های اصلی رویکرد تصمیم‌گیری در این گونه از صنایع است[۵]. از این رو، برنامه‌ریزان از طریق مدل‌های یکپارچه و شبکه‌ای درصنایع فرآیندی به دنبال مواردی همچون تعیین توان عملیاتی و شرایط محیطی فرآیندها، تنظیمات تکنولوژی برای هر واحد، تنظیم سطح مطلوب موجودی در مخازن میانی هر واحد فرآیند، میزان و نرخ ورود خوراک به فرآیندها و تصمیات اتخاذ شده برای خارج کردن محصول نهایی از فرآیندها هستند[۶].

از جمله چارچوب اساسی مدل‌های شبکه‌ای که برای برنامه‌ریزی تولید خطی در صنایع فرآیندی معرفی شده است، مدل شبکه‌ای فرمولبندی شده توسط ایراپتریتو و پستیکوپلس است که در شکل (۱) نشان داده شده است[۷]. این مدل در سال‌های بعد مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته شده است.

شبکه‌های فرآیندی در طی سال‌ها متمادی با تغییرات معناداری از محیط درون و بیرون مواجهه می‌شوند که بر میزان بازده خروجی تاثیر چشم‌گیری می‌گذارد؛ بنابراین نیاز اساسی به برنامه‌ریزی‌های استراتژیک و برنامه‌های تکنیکال و کنترل عملیات‌ها احساس می‌شود. این برنامه‌ها ب همچون تولید دارو، لاستیک، سیمان و پتروشیمی نتایج ضعیفی ارائه دهد.

بنابراین هدف اصلی این مقاله ارائه رویکرد برنامه‌ریزی پویای احتمالی بر اساس چارچوب مدل شبکه‌ای تولید در صنایع فرآیندی است. جنبه پویا بودن رویکرد مذکور از این نظر حائز اهمیت است که برنامه‌ریزی تولید را برای سناریوهای گوناگون شبیه‌سازی می‌کند. از جمله ویژگی منحصر به فرد این مدل لحاظ کردن تغییرات احتمالات در طول زمان است، این مهم از طریق مدل‌های زنجیره‌ای مارکوف گسسته زمان اجرا شده است. مثال عددی انجام شده کارایی این روش را مورد تایید قرار داده است.

توجه به این نکته که در کشورهای جهان سوم تغییرات عوامل (بیرونی و درونی) در طول زمان با شدت بیشتری صورت گرفته و گاها صنعت‌ها با شرایطی مواجهه می‌شوند که حتی در گذر زمان بی‌سابقه بوده است، این‌ها دلایلی است که رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی در محیط واقعی صنایع فرآیندی کارایی مطلوبی نداشته باشد، و یا در برخی از صنایع این عوامل را در چند وضعیت[۷] محدود طبقه‌بندی می‌گردد و در رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی، احتمال وقوع هر وضعیت مقداری ثابت یا از توزیع احتمالی مشهوری تبعیت می‌کند. جمله ضعف این رویکرد نحوه به کارگیری ماهیت شرایط احتمالی در مدل است. به طوری که عموما بدلیل ساده‌تر شدن تجزیه وتحلیل نتایج، این عوامل را در چند وضعیت۸ محدود طبقه‌بندی می‌گردد و در رویکرد برنامه-ریزی احتمالی، احتمال وقوع هر وضعیت مقداری ثابت یا از توزیع احتمالی مشهوری تبعیت می‌کند.

توجه به این نکته که در کشورهای جهان سوم تغییرات عوامل (بیرونی و درونی) در طول زمان با شدت بیشتری صورت گرفته و گاها صنعت‌ها با شرایطی مواجهه می‌شوند که حتی در گذر زمان بی‌سابقه بوده است، این‌ها دلایلی است که رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی در محیط واقعی صنایع فرآیندی کارایی مطلوبی نداشته باشد، و یا در برخی از صنایع همچون تولید دارو، لاستیک، سیمان و پتروشیمی نتایج ضعیفی ارائه دهد.

بنابراین هدف اصلی این مقاله ارائه رویکرد برنامه‌ریزی پویای احتمالی بر اساس چارچوب مدل شبکه‌ای تولید در صنایع فرآیندی است. جنبه پویا بودن رویکرد مذکور از این نظر حائز اهمیت است که برنامه‌ریزی تولید را برای سناریوهای گوناگون شبیه‌سازی می‌کند. از جمله ویژگی منحصر به فرد این مدل لحاظ کردن تغییرات احتمالات در طول زمان است، این مهم از طریق مدل‌های زنجیره‌ای مارکوف گسسته زمان اجرا شده است. مثال عددی انجام شده کارایی این روش را مورد تایید قرار داده است.

۲. پیشینه تحقیق

در ادبیات تحقیق پیش رو، ابتدا حوزه برنامه‌ریزی تولید یکپارچه و مدل‌های شبکه‌ای صنایع فرآیندی اشاره و سپس برخی مقالات مرتبط با رویکردهای برنامه‌ریزی پویا در این صنایع مرور می‌گردد. مختاری و همکاران در سال ۱۳۹۲ پس از مدلسازی یکپارچه مسأله برنامه‌ریزی ظرفیت تولید و مسأله زمانبندی تولید، به ارائه یک رویکرد حل تحلیلی می‌پردازند. در راستای کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل سفارشات، مفهومی تحت عنوان "زوج سفارش" تعریف و الگوریتمی جهت تعیین زوج سفارشاتِ بهینه بر مبنای مسأله تخصیص متقارن ارائه می‌شود. سپس در راستای تعیین توالی بهینه‌ی زوج سفارشات، الگوریتم شاخه و کرانی بر مبنای سه کران پائین پیشنهاد شده است[۵].

سیلوا و همکاران نیز در سال ۲۰۰۴ برنامه‌ریزی تولید صنایع پیوسته را برای یک شرکت تولید مواد ساختمانی واقع در کشور پرتقال ارائه کردند. مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح اعداد مختلط چند هدفه را توسعه داده شده است. اهدافی که در پژوهش مدنظر قرار داده‌اند، می‌توان به حداکثرسازی سود، حداقل سازی سفارش‌ها و کمترین تغییرات در سطح نیروی انسانی اشاره

کرد. آنها برای حل مدلشان از سیستم پشتیبانی تصمیم گیری واکنشی استفاده کردند[۸].

در صنایع فرآیندی پژوهش‌هایی نیز با رویکردهای سطح بندی یا سلسله مراتب اشاره شده است. در حالی که علاوه بر تولید بر توزیع محصولات درون زنجیره تامین تاکید دارد[۹]. در این رابطه پژوهش لیویز وهمکاران که در سال ۲۰۰۴ به چاپ رسیده دلالت به توجه آنها به برنامه‌ریزی تولید صنعت دارو است. برنامه‌ریزی ریاضی سیستماتک توسعه داده شده توسط آنها MILP ابعاد بزرگ است، که در محیطی چند سایتی به صورت دو مرحله‌ای فرمول‌بندی شده است[۴].

متغیرهایی که در محیط‌های شبکه‌ای مورد توجه محقیق قرار گرفته اشتراک اطلاعات است. کاظم زاده و همکاران در سال ۱۳۹۲ مطالعه بر سناریوی‌های مختلف اشتراک اطلاعات طراحی کردند. با ارزیابی عملکرد سناریوهای مختلف اشتراک اطلاعات در شبکه تولید، بهترین سناریوی موجود انتخاب شده است. نتایج این تحقیق با استفاده از طراحی آزمایشها، تاثیر پارامترهای فرایند تقاضا بر روی سود حاصل از اشتراک اطلاعات بررسی شد[۱۰].

از دیگر چالش هایی که در مدل‌های شبکه‌ای صنایع فرآیندی توسط برنامه‌ریزی ریاضی فرمول‌بندی می‌شوند، شرایط غیر قطعی به کار رفته در مدل‌ها اشاره کرد. مضاهری و همکاران در مقاله خود با هدف ارائه مدلی واقع بینانه‌تر از برنامه‌ریزی تولید یکپارچه تحت شرایط عدم قطعیت کمک گرفته‌اند. مدل به کار گرفته شده در مقاله آنها مدل تصادفی دو مرحله‌ای است که از مقیاس شش سیگما به منظور حداقل‌سازی عیوب تولید بهره گرفته‌اند. در نهایت نتیجه کار را به صورت یک مجموعه از جواب بهینه پاراتو که در تصمیم‌گیری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، گزارش کردند[۱۱].

رویانی و فاتحی مقاله خود را در سال ۱۳۹۲ با هدف تعیین مقدار بهینه تولید در یک سیستم تولید دو سطحی منتشر ساختند. آنها در پژوهش خود از دو سطح تولیدی شامل یک تولیدکننده و یک انبارمرکزی با اضافه کردن محدودیت تاثیرپذیری تقاضا از متوسط درصد کمبود مورد بررسی قرار دادند. ویژگی برجسته این مساله احتمالی بودن تقاضاهاست. آنها پس از ارایه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی، از دو روش شاخه وکران و روش گرادیان کاهشی تعمیم یافته برای حل مدل استفاده کرده و کارایی روش های پیشنهادی خود را به کمک آزمایش های عددی مورد ارزیابی قرار دادند[۱۲].

همچنین، در سال ۲۰۰۸ مطالعاتی توسط سائو و همکاران در زمینه برنامه‌ریزی تولید و زمانبندی نفت خام که به عنوان خوراک دریافتی بود، صورت گرفته است. از ویژگی‌های مدل آنها می‌توان به صورت غیرقطعی بودن تقاضا، چند محصولی و غیرخطی بودن برخی پارامترها اشاره کرد. مساله برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح اعداد مختلط فازی توسعه داده شده آنها، بر اساس محدویت‌هایی تصادفی فرمول بندی شده است. روش حل مدل آنها در مساله ابعاد بزرگ شامل دو مرحله است: ابتدا دو مساله حمل و نقل از روش شبکه فرآیند چندخطی با جریان‌های وابسته حل می‌گردد، سپس از یک مدل تعادلی فازی برای تعیین احتمالات کمک گرفته می‌شود. هر دو مساله با نرم افزار LINGO نسخه هشتم حل شده و نتایج از طریق مطالعه موردی اعتبارسازی می‌گردد[۱۳] .

به طور خلاصه ، برخی از عوامل که در سال‌های اخیر توسط محققان به صورت احتمالی و غیرقطعی در برنامه‌ریزی‌های تولید و عملیات صنایع فرآیندی مورد بررسی قرار گرفته است و در دو گروه دسته بندی شده است. این نوع گروه‌بندی توسط گویل و همکاران در سال ۲۰۰۴ پیشنهاد شده است[۱۴]. دو گروه عوامل درونی و بیرونی و زیرعامل‌های آنها در زیر ذکر شده است.

عوامل بیرونی

- میزان دسترسی به منابع اولیه از جمله تامین خوراک
- داده‌های اقتصادی ورودی‌ها و مواد میانی و محصولات خروجی و خدمات و غیره
  - قیمت خوراک و مواد
  - هزینه‌های تولید
  - هزینه‌های توزیع و انتقال
  - تقاضاهای بازار
- تقاضاهای تولید: از جمله مقدار تولید نهایی و مشخصات کیفی محصولات
- موقعیت بخش‌های توزیع و تحویل
- میزان بودجه قابل سرمایه‌گذاری برای خریداری تجهیزات جدید یا تعویض آنها با هدف افزایش ظرفیت
- میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای فرآیندها (به عنوان مثال تهیه لیسانس‌های معتبر که منجر افزایش تکنولوژی فرایند تولید می‌شود)

عوامل درونی

- کیفیت و مشخصات و پارامتر جریان‌ها
- خروجی یا درصد تفکیک حین فرآیند/محصول
- تنظیمات فرآیندها و اختلاط
- قابلیت اطمینان تجهیزات

از جمله روش‌هایی حل که در چارچوب مدل های شبکه ای صنایع فرآیندی مورد توجه قرار گرفته شده است، سیستم اجرایی تولید۹ می‌باشد. این روش در سال ۲۰۰۸ توسط لی و همکاران مطرح شده است. هدف آنها از این مقاله انطباق دادن مدل‌های

مواد جریان با فرآیندهای تولید در مجتمع پتروشیمی در کشور چین بوده است. آنها برای حل مدل خود از زیر سیستم‌هایی پیشنهادی با نام SinoMES بهره گرفته اند. در نهایت در مدل ریاضی‌آنها جریان مواد به عنوان پارامتری پویا در نظر گرفته می-شود[۱۵].

نیلسون و همکاران مقاله‌ای در سال ۲۰۰۹ منتشر ساختند که بر محوریت برنامه‌ریزی زمانبندی تولید برخی از روان‌کننده‌های صنعتی قرار داشت. چالش مرتبط با تولید بر اساس مدل بهینه-سازی شبکه جریان و مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط دودویی۱۰ است و این پژوهش با هدف ارزیابی بر اساس رویکرد شبیه‌سازی استوار قرار دارد[۱۶].

در جمع‌بندی مطالعات صورت گرفته در برنامه‌ریزی تولید صنایع فرآیندی عوامل تاثیرگذار بر تصمیم‌ها که قطعی یا غیرقطعی هستند، می‌توان به میزان دسترسی به خوراک به عنوان مواد اولیه، هزینه‌های فرآیندها و پارامترهایی که در تولید محصول نقش دارند، داده‌های اقتصادی همچون قیمت فروش و نگهداری مواد، هزینه‌های انتقال و توزیع و همچنین داده‌های مرتبط با تقاضای بازار از محصولات تمام شده، نام برد.

از مطالعه موارد مطرح شده این نکته دریافت می‌شود که لحاظ کردن تمامی عوامل منجر به پیچیدگی مساله شده است؛ در عین حال منجر به ارائه مدل‌هایی می‌شود که حتی قوترین نرم افزارها محاسباتی قادر به حل آنها نیستند. در این مقاله برای فایق آمدن بر این چالش، برخی از عوامل درونی واحدها در یکدیگر ادغام شده و به طور کلی با نام بازده۱۱ خروجی واحد فرآیندی نامگذاری گردیده شده است. بنابراین، مدلسازی این مقاله بر اساس تاثیر میزان تغییرات بازده خروجی در اهداف برنامه‌ریزی تولید فرمولبندی شده است. در ادامه برخی از رویکردهایی که برای حل اینگونه مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته، عنوان شده است.

از جمله رویکردهای ریاضی در حل این دسته از مسایل اشاره به روش‌های برنامه‌ریزی پویا می‌شود. محققین چند علت و دلیل برای استفاده از این روش عنوان کرده‌اند، که مهمترین آنها پیوستگی در تولیدات محصولات در این صنایع و قابلیت بکارگیری متغیرها به صورت احتمالی نام برده اند. تاکنون این روش در حل مسایلی در زمینه تامین نفت خام ، انتقال‌ها ، مدیریت عملیات، زمانبندی و برنامه‌ریزی تولید به کار گرفته شده است[۱۷].

یکی از حساس‌ترین حوزه صنایع فرآیندی در امور تولید، صنعت ساخت نیمه رساناها است. در این حیطه اشاره به مقاله چاین و همکاران خالی از لطف نیست. آن‌ها در بررسی خود نتیجه گرفتند بخش‌هایی از تجهیزات را مشترک قرار دهند. بنابراین برخورداری از یک استخر مشترک ابزار را به عنوان راهکاری مناسب پیشنهاد کردند. در مقاله آن‌ها مدیریت تولید اختصاص ابزارها را به صورت پویا برنامه‌ریزی می‌کند. روش بهینه‌سازی پویا که بر اساس مکانیسم‌های پیش‌بینی تقاضا قرار گرفته‌اند، از جمله رویکرد حل این مساله است[۱۸].

در همین خصوص پژوهش اتسوی و همکارانشان در بردارده مساله تولید-موجودی است. از جمله ویژگی‌های اشاره شده در مدل آنها احتمالی بودن تامین عنوان شده است. همچنین تقاضا در طول زمان پویا در نظر گرفته شده است. روش حل به کار گرفته شده برای سیستم کنترل موجودی استراتژی‌های برنامه‌ریزی پویاست. این مطالعه ارایه کننده یک الگوریتم پیشنهادی برای مسایل برنامه ریزی تولید در صنعت فولاد است[۱۹].

علاوه بر بحث مدیریت موجودی در برنامه‌ریزی تولید صنایع فرآیندی، سیستم‌های حمل ونقل نیز در مدل‌ها ادغام می‌شود. این ترکیب در مقاله زایو و همکاران مشاهده شده است. آنها پژوهش خود را برای صنایع تولید زغال سنگ انجام داده اند. روش حل آنها فرآیند تصمیم گیری مارکوف است. هدف از این مطالعه حل مسایلی است که با وجود پویایی در هزینه های موجودی و حمل ونقل میزان زمان سفارش‌دهی و دریافت را به طور مناسب تعیین می‌کند. در نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که در صنعت ذکر شده این نوع از رویکرد می‌تواند هزینه‌های overall را کاهش دهد[۲۰].

در پیشینه تحقیق ترکیب مدل‌های موجودی با مدل‌های برنامه-ریزی تولید، سیاست کنترل پذیرش موجودی از جمله زمینه‌هایی است که زنجیره مارکوف نیز برای حل مساله پیشنهاد شده است. در مقاله ایوندیس دو دسته مشتری در نظر گرفته شده بودند. آنها در پژوهش خود با به کارگیری سیستم کنترل موجودی تصمیم-هایی در زمینه سفارش مجدد اتخاذ می‌کردند. مدلی که این نویسنده در سال ۲۰۱۱ منتشر کرد از یک سیستم مارکوف تک مرحله‌ای بهره گرفته شده است. مولفه‌های ماتریس احتمال آن بر اساس الگوریتم‌هایی ابتکاری بر پایه کنترل بهینه پارامترها محاسبه می‌شود[۲۱].

از دیگر موارد کاربرد رویکرد فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف در صنایع فرآیندی باید به دو مقاله ین و همکارانشان اشاره کرد. محیط مورد مطالعه آنها صنعت کاغذسازی است. آنها رویکرد مارکوف را در سیستم کنترل موجودی به کار گرفتند. تقاضا به صورت تابع توزیع احتمالی است. این برنامه‌ریزی تولید برای محصول پایانی انجام شده است. ساختار و ارزیابی هزینه‌ها مستقل از یکدیگر بررسی صورت گرفته است. در نهایت با الگوریتم

پیشنهاد شده آنها، سیستم برنامه‌ریزی پویا را برای انتخاب بهترین استراتژی توسعه می‌دهند[۲۲].

یکسال بعد همین مولف و همکارنشان یک الگوریتم عددی را برای برنامه ریزی تولید همین صنعت پیشنهاد کردند. میزان ظرفیت تولید و تقاضا به صورت احتمالی در مدل لحاظ می‌شود. برای حل این مدل نیز آنها از مدل های احتمالی سیستم‌های برنامه‌ریزی پویا بهره گرفتند. پیشنهاد آنها توسعه زنجیره مارکوف زمان پیوسته دو مرحله ای بود[۲۳].

همانگونه که از مرور ادبیات رویکردهای حل مشاهده می‌شود، غالب تحقیقات انجام شده در ارتباط با برنامه‌ریزی احتمالی بوده و ضرورت انجام تحقیقات بیشتر از طریق برنامه‌ریزی پویای احتمالی احساس می‌شود.

در سال‌های گذشته تلاش برخی از پژوهشگران بر این نکته بوده است که مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای حل مسایل برنامه‌ریزی تولید در صنایع فرآیندی است. به عنوان مثال ژو و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل مارکوف را برای تعیین بهترین مقدار محصولات پتروشیمی ارایه و سعی کردند هزینه‌های تولید را در یک افق زمانی محدود حداقل کنند. مقاله آنها بر اساس شرایط حاکم بر کشور چین و کشورهای دریافت کننده مواد نفتی پایه‌گذاری شده است. به عبارت دیگر مولفین این مقاله استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویای احتمالی را مفیدترین راه‌کار برای امنیت و کاهش ریسک تامین نفت خام دانسته اند[۲۴].

بر اساس مطالعات اخیر، در کشورهای نفت خیز علل خصوص کشورهای حوزه خلیج فارس که دریافت خوراک ورودی صنایع نفتی به صورت پیوسته و از طریق شبکه‌ای از لوله ها تامین می-شود، این نیاز احساس می‌شود که محوریت تغییرات در چه بخش از این صنایع فرآیندی اتفاق افتاده و تاثیر آن بر برنامه‌ریزی تولید مورد بررسی قرار گیرد؟ تاش این پژوهش پاسخ به این دسته از سوال‌ها است که به شکاف‌های مطرح شده در ادبیات موضوع اهمیت می‌دهد.

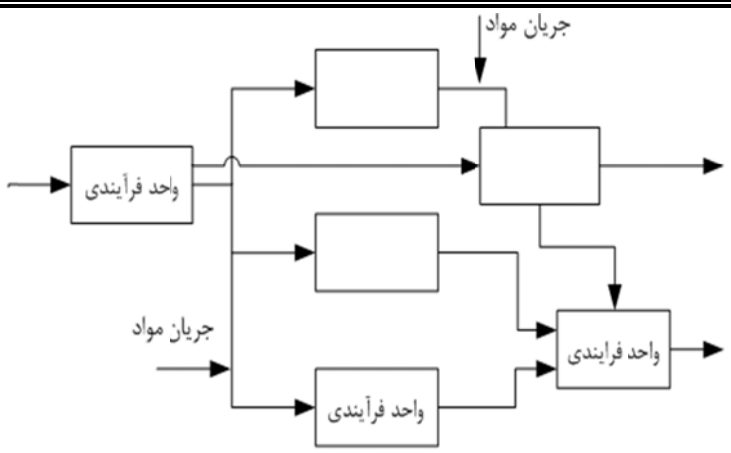
ساختار مقاله حاضر به این قرار است: در بخش سوم مساله تعریف و مدل ریاضی تحقیق با توجه به چارچوب مدل‌های شبکه‌ای ارائه شده است. در بخش چهارم به تشریح رویکرد برنامه‌ریزی پویای احتمالی پرداخته شده است. در بخش پنجم نتایج تجربی و نتایج حاصل شده از حل مدل تشریح شده است. و در نهایت نتیجه گیری، در بخش ششم بیان شده است.

۳. تعریف مساله

ساختار شبکه‌ای به تصویر کشیده شده شکل (۱) را در نظر گیرید که مستطیل ها نمایشگر واحد فرآیندی $u \in \{1,2,\cdots,UO\}$ است که خطوط میان آنها تعداد $s \in \{1,2,\cdots,SO\}$ جریان مواد به صورت پیوسته تا تبدیل شدن به محصول نهایی، میان واحدها عبور می‌کنند. برنامه‌ریزی تولید برای محصولات در طول افق $t \in \{1,2,\cdots,T\}$ دوره زمانی صورت می‌گیرد. جریان مواد ورودی به شبکه در هر یک از واحدهای فرآیندی عملیاتی تغییری فیزیکی یا شیمیایی بر روی آن صورت می‌گیرد.

در بعضی از موارد بخشی از محصول میانی مستقیم به بازار عرضه می‌شود؛ مابقی برای انجام عملیات جدید به واحدهای پایین دست ارسال می‌گردد. در این میان واحدهای را در دو دسته محصول مایع و محصول جامد طبقه بندی می‌شوند. بنابراین محصولات مایع را قبل از تحویل به مشتریان در مخازن و محصولات جامد را در انبارها ذخیره‌سازی می‌کنند. در دنیای واقعی کلیه خوراک ورودی به واحدها به محصول تبدیل نمی‌شود. به عبارت دیگر، در بیشتر صنایع فرآیندی میزان درصد خروجی واحدها در طول زمان از متغیر تصادفی پیروی می‌کند.

هدف اصلی این مقاله تعیین میزان تولید محصولات در پایین دست با توجه به میزان ذخیره و فروش محصولات میانی در طول افق زمانی است. این تصمیمات با توجه به حداکثر سازی میزان سود با توجه به حداقل سازی هزینه‌های مواد اولیه، نگهداری موجودی مخازن و انبارها صورت می‌پذیرد. حال با توجه به مدل فرمولبندی شده در حالت تصادفی بودن درصد خروجی واحدها در طول زمان، رویکرد ریاضی برنامه‌ریزی پویا بمنظور حل مدل بکار گرفته شده است. قبل از معرفی ساختار مدل، متغییرها و عوامل تصمیم گیری مساله به صورت زیر معرفی می‌شود.



شکل ۱. شبکه‌ای از عملیات تولید در صنایع فرآیندی (بر پایه مقاله ایراپتریتو و پستیکوپلس در سال ۱۹۹۴)

۳-۱. اندیس‌ها

s : اندیس جریان مواد

t : اندیس دوره زمانی

u, u', u'': اندیس واحدهای فرآیند و ذخیره‌سازی

i : اندیس حالات میزان خروجی واحدها (سناریوها)

۳-۲. مجموعه‌ها

$SO_{u,s}$: مواد خروجی از واحد u

T: دوره‌های زمانی

$UO_{u,s}$: واحدهای دریافت کننده جریان مواد s (خوراک) از واحد u

US_u: جفت جریان مواد / واحد (u',s) تامین‌کننده خوراک واحد u

U_{pu}: واحدهای فرآیندی

U_{tank}: واحدهای ذخیره‌ساز میانی (درام ها یا مخازن ذخیره مایعات)

U_{WH}: واحد ذخیره‌سازی محصولات جامد (انبارها)

۳-۳. پارامترها

$Cp_{u,t}$: قیمت فروش هر واحد محصول میانی از واحد u در دوره زمانی t ام

$\lambda_{p,t}$: قیمت فروش هر واحد محصول جامد p در دوره زمانی t ام

$Cinv_{u,t}$: هزینه نگهداری محصول میانی از واحد u دوره زمانی t ام

$Yield_{u,s,t,i}$: درصد خروجی جریان مواد s حاصل از واحد u بر اساس سناریو i در دوره زمانی t ام

$Hol_{p,t}$: هزینه نگهداری محصول جامد p واحد u دوره زمانی t ام

$Cpet_{f,t}$: هزینه تامین خوراک f در دوره زمانی t ام

$Dem_{u,t}$: تقاضای محصولات میانی از واحد u در دوره زمانی t ام

$D_{u,p,t}$: تقاضای محصول جامد p در واحد u در دوره زمانی t ام

QF_u^L / QF_u^U : بالاترین و پایین‌ترین کران نرخ جریان خوراک ورودی به واحد u

Vol_u^L /Vol_u^U : بالاترین و پایین‌ترین کران محصولات مایع ذخیره شده واحد u

QS_u^L / QS_u^U: بالاترین و پایین‌ترین کران نرخ جریان محصول خروجی از واحد u

۳-۴. متغیرها:

$QF_{u,t}$: میزان نرخ جریان خوراک به واحد u در دوره زمانی t ام

$QS_{u,s,t}$: میزان نرخ جریان مواد s خارج شده از واحد u در دوره زمانی t ام

$Q_{u',s,u,t}$: میزان نرخ جریان مواد s انتقال یافته بین واحد u و واحد u' در دوره زمانی t ام

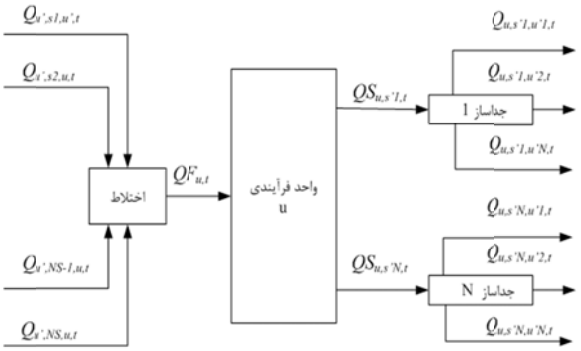
$Vol_{u,t,i}$: سطح موجودی مایعات میانی ذخیره‌سازی شده در واحد u بر اساس سناریو i در دوره زمانی t ام

$I_{u,p,t}$: میزان موجودی محصول جامد p در انبار ذخیره‌سازی واحد u در دوره زمانی t ام

$X_{u,p,t}$: میزان تولید از محصول جامد p واحد u در دوره زمانی t ام

$\varphi_{u,s,u',t}$: متغیری صفر و یک و ۱ اگر جریان مواد s از واحد ذخیره سازی u به واحد u' در دوره زمانی t ارسال گردد؛ ۰ در غیر این صورت صفر.

مدل شبکه‌ای به کار گرفته شده در این مقاله در سال ۲۰۰۴ توسط نریو و پنتو مطرح شده است[۲۵]. از خصوصیت اساسی این مدل‌سازی آن است که تمامی رویدادها را تنها به صورت واحد فرآیند نشان می‌دهد. فرآیند واحد به مجموعه‌ای از تجهیزات اتلاق می‌گردد که به صورت فیزیکی یا شیمیایی تغییری یا تحولی بر روی مواد ورودی (خوراک) ایجاد می‌کنند. نحوه نمایش تمامی فرآیندهای واحد درون شبکه‌های فرآیندی از یک نمایش عمومی شکل (۲) تبعیت می‌کند.



شکل ۲. نمایش واحد فرآیند

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است. سیالات در نقطه با نام بخش اختلاط (Mixture) به یکباره در یکدیگر ادغام شده و منجر به ایجاد متغیری با نام $QF_{u,t}$ می‌کند که نشان دهنده خوراک ورودی واحد u در دوره زمانی t است. پس از طی پردازش مورد نیاز توسط واحد u مجموعه‌ای از سیال محصول $\{s'_1,s'_2,...,s'_{NS}\}$ با نام $QS_{u,s',t}$ خارج می‌شوند. سپس هر کدام از این خروجی‌ها به منظور ارسال به واحدهای دیگر، در بخش جداساز (Splitter) تقسیم بندی می‌شوند. معادلات تعادلی توصیف کننده مدل واحد فرآیندی $u \in U_{pu}$ مطابق زیر است:

$$QF_{u,t} = \sum_{(u',s)\in US_u} Q_{u',s,u,t} \qquad \forall u \in U_{pu}, t \in T \quad (1)$$

$$QS_{u,s,t} = QF_{u,t}.Yield_{u,s,t} \qquad \forall u \in U_{pu}, s \in SO_u, t \in T \quad (2)$$

$$QS_{u,s,t} = \sum_{(u',s)\in US_u} Q_{u,s,u',t} \qquad \forall u \in U_{pu}, s \in SO_u, t \in T \quad (3)$$

$$QF_u^{\,L} \le QF_{u,t} \le QF_u^{\,U} \qquad \forall u \in U_{pu}, t \in T \quad (4)$$

$$Vol_{u,t} = Vol_{u,t-1} + QF_{u,t} - Dem_{u,t} - QS_{u,s,t}$$
$$\forall u \in U_{pu}, s \in SO_u, t \in T \quad (5)$$

$$\varphi_{u,s,u',t}.Q_{u,s}^{\,L} \le Q_{u,s,u',t} \le \varphi_{u,s,u',t}.Q_{u,s}^{\,U}$$
$$\forall u \in U_{pu}, s \in SO_u, u' \in UO_{u,s}, t \in T \quad (6)$$

$$Vol_u^{\,L} \le Vol_{u,t} \le Vol_u^{\,U} \qquad \forall u \in U_{pu}, t \in T \quad (7)$$

$$I_{u,p,t-1} + X_{u,p,t} - D_{u,p,t} = I_{u,p,t}$$
$$\forall u \in U_{pu}, p \in POL, t \in T \quad (8)$$

رابطه (۱) توصیف کننده برقراری تعادل میان بخش اختلاط با واحد u است. به طور کلی رابطه (۲) ارتباط بین نرخ جریان محصول با نرخ جریان خوراک ($QF_{u,t}$) را تعیین می‌سازد. در این رابطه $Yield_{u,s,t}$ میزان درصد تفکیک خوراک یا میزان محصول خروجی را مشخص می‌سازد. با استفاده از رابطه (۳) می‌توان میان میزان محصول تولیدی از یک واحد با مجموع آن محصول به تمامی واحد های دیگر، تعادل برقرار کرد. رابطه (۴) تضمین کننده آن هستند که میزان خوراک از محدوده خاصی تجاوز نکنند.

در تفسیر رابطه (۵) اگر میزان دریافتی دوره ($QF_{u,t}$) را با میزان محصول میانی ذخیره‌شده دوره قبل ($Vol_{u,t-1}$) جمع کرده و از طرفی میزان تقاضای آن دوره ($Dem_{u,t}$) و میزان ارسال شده به جداساز ($QS_{u,t}$) را از آن کم کنیم آنچه باقی می‌ماند، میزان ذخیره‌سازی از محصول درآن دوره ($Vol_{u,t}$) است. همچنین رابطه (۶) و (۷) دامنه‌ای برای جریان مواد ارسالی به واحدهای دیگر و میزان موجودی قابل ذخیره مخازن میانی وتانک‌ها را در هر دوره، مشخص می‌سازد.

رابطه (۸) توصیف‌کننده میزان محصولات ذخیره شده واحدهای محصول جامد است که درون انبارها بدون محدودیتی قابل انبارش می‌باشد؛ برای این منظور اگر میزان تولید ($X_{u,p,t}$) محصول p را به میزان ذخیره در انبار اضافه گردد و در پایان دوره میزان سفارش داده شده ($D_{u,p,t}$) را به مشتریان تحویل گردد، باقی‌مانده میزان سطح موجودی انبار است.

۳-۵. تابع هدف

عناصری که در بخش‌های گذشته معرفی شد به عنوان مجموعه‌ای از معادلاتی است که ایفا کننده نقش محدودیت‌ها برای مساله بهینه‌سازی می‌باشند. تابع هدف به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$Max\ Z = \sum_{u\in U_{pu}}\sum_{t\in T} Cp_{u,t}.Dem_{u,t} + \sum_{u\in U_{pu}}\sum_{p\in POL}\sum_{t\in T} \lambda_{p,t}.D_{u,p,t}$$
$$- \sum_{F\in Feed}\sum_{u\in U_{pu}}\sum_{t\in T} Cpet_{F,t}.Q_{F,u,t} - \sum_{u\in U_{pu}}\sum_{t\in T} Cinv_{u,t}.Vol_{u,t}$$
$$- \sum_{u\in U_{pu}}\sum_{p\in POL}\sum_{t\in T} Hol_{p,t}.I_{u,p,t} \quad (9)$$

واضح است که رابطه (۹) با هدف حداکثرسازی میزان سود و با توجه به حداقل سازی هزینه‌های مواد اولیه، نگهداری موجودی مخازن وانبارها فرمول‌بندی شده است.

در این پژوهش، خروجی یا درصد تفکیک حین فرآیند/محصول را به صورت متغیری تصادفی درنظر گرفته شده است. دانشمندان و محقیق در پیشنه موضوع علت‌هایی همچون کیفیت ومشخصات خوراک ورودی، شرایط تجهیزات حساس ، درجه قابلیت اطمینان تجهیزات را بر این عامل تاثیرگذار دانسته اند. در واقع تغییر و نوسان این عوامل در گستره وسیعی از مقادیر صورت می‌گیرد. اما پژوهشگران بدلیل تجزیه و تحلیل ساده‌تر خروجی مدل، مقادیر بازده خروجی هر واحد را در طول زمان در k سناریو مشهودتر دسته‌بندی می‌کنند[۲۶].

بنابراین تعداد k نوع مختلف سناریو براساس میزان انحراف از مقدار استاندارد برای نشان دادن احتمالی بودن درصد تفکیک حین فرآیند در جدول (۱) نشان داده شده است. اصلی‌ترین هدف و نوآوری این مقاله است که تصمیم‌گیری کارا و تاثیر گذار سیستم تولید با در نظر گرفتن جابجایی میزان خروجی واحدها در طول زمان ادعا شده است.

جدول ۱ . درصد خروجی یا درصد تفکیک فرآیند/محصول

خانواده محصول	وضعیت۱	وضعیت۲	…	وضعیتK
محصول ۱	$yield_{u,1}$	$yield_{u,1}$	…	$yield_{u,1}$
محصول ۲	$yield_{u,2}$	$yield_{u,2}$	…	$yield_{u,2}$
محصول ۳	$yield_{u,3}$	$yield_{u,3}$	…	$yield_{u,3}$
…	…	…	…	…
محصولS	$yield_{s}$	$yield_{s'}$	…	$yield_{s}$

۴. برنامه‌ریزی پویایی احتمالی

فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف (MDP[۱۲]) نام دیگر برنامه ریزی پویا احتمالی است که در سال ۱۹۶۰ برای اولین بار معرفی شد. MDP عمدتا بمنظور مدل‌سازی و حل مسائل تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی پویا چند دوره‌ای، تحت شرایط احتمالی مورد استفاده قرار گرفته شده است. از جمله موارد کاربرد این روش می‌توان به ارتباطات، پردازش سیگنال، هوش مصنوعی، برنامه زمان‌بندی احتمالی و سیستم‌های تولید، سیستم‌های رویداد گسسته، مدیریت و اقتصاد اشاره کرد[۲۷].

وقوع اتفاقاتی که پی در پی در یک محیط در حال رخ دادن است، از ویژگی بارز مدل مارکف گسسته زمان معرفی می‌شود. بنابراین در هر لحظه از زمان تصمیم‌گیرنده به دنبال پاسخ گویی به این سوال است که چه میزان احتمال برای انتقال به هر کدام از پیشامدها پیش بینی می‌گردد؟ پاسخ به این سوال هدف به کارگیری مدل‌ها مارکف در مسائل عنوان می‌شود. در تعاریف پیشامدهای موجود، با نام حالات تعریف شده است.

تعریف ۱) تعداد کل حالت‌های yield (درصد خروجی واحدها) مدل مارکف برابر K است. که به صورت $y^1,y^2,\ldots,y^k$ نشان داده شده است. پس، ماتریس k×k زیر با عنوان ماتریس احتمال انتقالی تشکیل می گردد:

$$p=\begin{array}{c} \\ y^1 \\ y^2 \\ \\ \\ \\ y^{k-1} \\ y^k \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} y^1 & y^2 & & & y^{k-1} & y^k \end{array} \\ \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdot & \cdot & p_{1k-1} & p_{1k} \\ p_{21} & p_{22} & \cdot & \cdot & p_{2k-1} & p_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{k-11} & p_{k-12} & \cdot & \cdot & p_{k-1k-1} & p_{k-1k} \\ p_{k1} & p_{k2} & \cdot & \cdot & p_{kk-1} & p_{kk} \end{bmatrix} \end{array}$$

مقادیر p_{ij} نشان دهنده احتمال انتقال از حالت y^i ام به حالت y^jام در طول مدت زمان یک دوره است.

تعریف ۲) مقدار زمان سپری شده یک حالت قبل از رفتن به حالت بعد نیز بر میزان مولفه‌های ماتریس P تاثیرگذار خواهد بود. اگر در فرآیندی نتوان از سوابق تغییرات حالات یا به عبارتی میزان خروجی واحدها در طول افق زمانی استفاده کرد و در اصطلاح بی-حافظه باشد آنگاه این امکان وجود دارد در هر دوره‌ای از زمان بطور بالقوه تمامی میزان خروجی واحدها می تواند به وقوع بپیوندد.

برای این منظور، $\emptyset_{im}(t)$ نشان دهنده درایه‌های ماتریس احتمال انتقال بعد از سپری شدن t دوره زمانی است. به عبارت دیگر درایه $\emptyset_{im}(t)$ این مفهوم را تداعی می‌کند که احتمال اینکه بعد از t دوره زمانی سیستم در حالت y^m باشد، به شرط آنکه که در دوره زمانی ابتدایی در حالت y^i بوده است. به منظور محاسبه ماتریس انتفال فرض برآن است که سیستم حداقل به یکی دیگر از حالات (y^l) انتقال یابد و دقیقا در t دوره زمانی بعد به حالت y^m رسیده باشد. مدت زمان یا تعداد دوره زمانی سپری شدن از دوره ابتدایی تا رسیدن به حالت y^l برابر با t_1 باشد. محاسبه $\emptyset_{im}(t)$ در رابطه شماره (۱۰) نشان داده شده است.

$$\emptyset_{im}(t)=\sum_{l=1}^{k} P_{il}^{(t_1)}\times P_{lm}^{(t-t_1)} \qquad (10)$$

در مدل برنامه‌ریزی تولید شبکه‌ای، مهمترین عامل تاثیرگذار بر میزان سود نهایی میزان خروجی هر واحد در ابتدای هر دوره است. از جمله فرض به کار رفته در این پژوهش ثابت بودن این میزان خروجی در طول هر دوره است. بنابراین، رویکرد برنامه‌ریزی تولید

پیشنهاد شده شامل مجموعه‌ای از تصمیمات متوالی احتمالی است که در ابتدای هر دوره اتخاذ می‌شود.

اگر $E_j(y^i)$ نشان‌دهنده مجموع سود از دوره زمانی j تا آخرین دوره (T) باشد، محاسبه آن وقتی صورت می‌گیرد که سطح موجودی انبار محصول جامد در انبار ذخیره‌سازی در پایان دوره j-1 ام به صفر رسیده باشد. همچنین احتمال اینکه بعد از r-j دوره زمانی میزان خروجی هر واحد از سناریو iام به سناریو mام تغییر یابد، برابر مقادیر $\emptyset_{im}(r-j)$ است؛ زیرا که در رویکرد فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف تغییر میزان خروجی‌ها در طول افق زمانی بی حافظه است. با توجه به رویکرد معرفی شده تابع هدف پویای احتمالی رابطه (۹) به صورت رابطه (۱۱) بازنویسی می‌گردد:

$$E_j(y^i)=\underset{j<r\le T}{Max}\left\{\sum_{u=1}^{U_{tank}}\sum_{t=j}^{r}Cp_{u,t}.Dem_{u,t}+\sum_{u=1}^{U_{WH}}\sum_{p=1}^{POL}\sum_{t=j}^{r}\lambda_{p,t}.D_{u,p,t}-\sum_{F=1}^{Feed}\sum_{u=1}^{U_{pu}}\sum_{t=j}^{r}Cpet_{F,t}.Q_{F,u,t}-\sum_{u=1}^{U_{tank}}\sum_{t=j}^{r}Cinv_{u,t}.Vol_{u,t}-\sum_{u=1}^{U_{WH}}\sum_{p=1}^{POL}\sum_{t=j}^{r}Hol_{p,t}.I_{u,p,t}+\sum_{m=1}^{k}\emptyset_{im}(r-j).E_r(y^m)\right\}$$
$$\forall i\in\{1,2,...,K\} \qquad (11)$$

بخش‌های ابتدایی رابطه (۱۱) در مدل های کلاسیک توضیح داده شده است. سیستم از میزان خروجی حالت y^i بعد از گذشت زمان مورد محاسبه به حالت y^m رسید میزان سودهای احتمالی کسب-شده تا پایان افق برنامه‌ریزی با چه مقداری به این سودها اضافه می‌شود؛ این مهم در بخش پایانی رابطه (۱۱) نشان داده شده است. علاوه بر تابع هدف محدودیت‌های (۱) تا (۸) نیز به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$QF_{u,t}=\sum_{(u',s)\in US_u}Q_{u',s,u,t}\qquad\forall u\in U_{pu},t\in\{j,j+1,....,r\}\quad(12)$$

$$QS_{u,s,t}=QF_{u,t}.Yield_{u,s,i}\qquad\forall u\in U_{pu},s\in SO_u,t\in\{j,j+1,....,r\}\quad(13)$$

$$QS_{u,s,t}=\sum_{(u',s)\in US_u}Q_{u,s,u',t}\qquad\forall u\in U_{pu},s\in SO_u,t\in\{j,j+1,....,r\}\quad(14)$$

$$QF_u^{\,L}\le QF_{u,t}\le QF_u^{\,U}\qquad\forall u\in U_{pu},t\in\{j,j+1,....,r\}\quad(15)$$

$$Vol_{u'',t-1,i}+Q_{u,s,u'',t}-Dem_{u'',t}-Q_{u'',s,u',t}=\sum_{m=1}^{k}\emptyset_{im}(r-j).Vol_{u'',t,m}$$
$$\forall\{u',u\}\in U_{pu},s\in SO_u,u''\in U_{tank},t\in\{j,j+1,....,r\}\quad(16)$$

$$\varphi_{u,s,u',t}.Q_{u,s}^{\,L}\le Q_{u,s,u',t}\le\varphi_{u,s,u',t}.Q_{u,s}^{\,U}\qquad\forall u\in U_{pu},s\in SO_u,u'\in UO_{u,s},t\in\{j,j+1,....,r\}\quad(17)$$

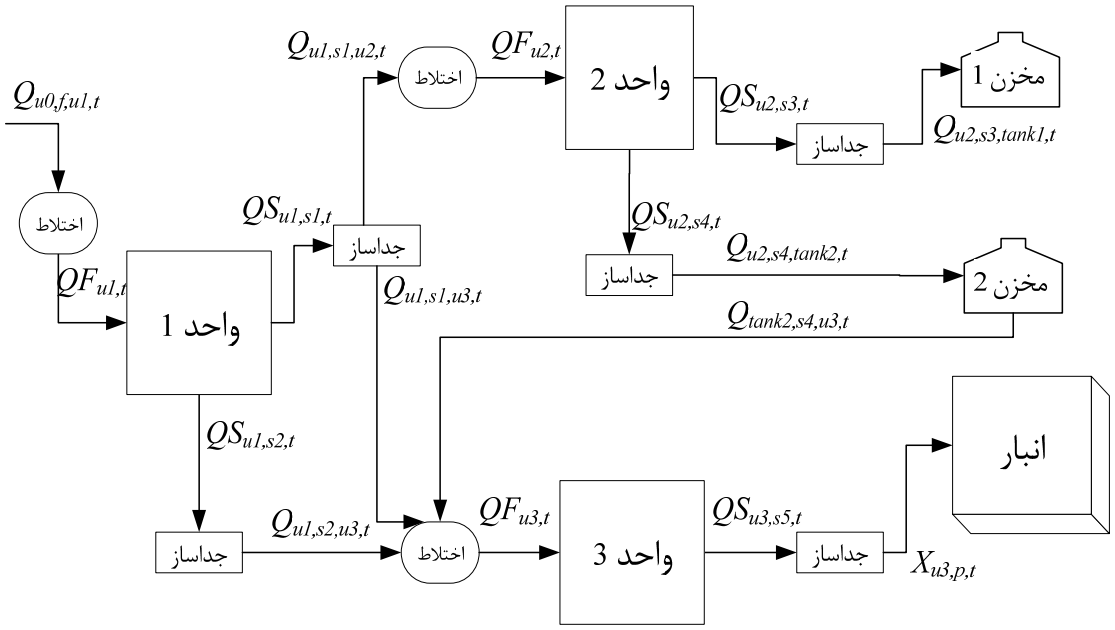
$$Vol_{u''}^{\,L}\le Vol_{u'',t}\le Vol_{u''}^{\,U}\qquad\forall u''\in U_{tank},t\in\{j,j+1,....,r\}\quad(18)$$

$$I_{u,p,t-1}+X_{u,p,t}-D_{u,p,t}=I_{u,p,t}\qquad\forall u\in U_{pu},p\in POL,t\in\{j,j+1,....,r\}\quad(19)$$

$$I_{u,p,j-1}=I_{u,p,r}=0\qquad\forall u\in U_{pu},p\in POL\quad(20)$$

از رابطه (۱۶) استنباط می‌شود که میزان موجودی میانی محاسبه شده درون مخازن در دوره های بعدی در مدل‌های قبل نیز با توجه به ماتریس انتقال لحاظ می‌گردد.

نهایتا، با فرض آنکه میزان موجودی میانی(محصولات مایع) در دوره زمانی T و همچنین میزان $E_T(y^i)$ با توجه به $i=1,2,...,k$ برابر صفر در نظر گرفته شده است؛ پس،مدل برنامه‌ریزی تولید احتمالی از طریق روش پس‌رو مدل‌های برنامه‌ریزی پویا از انتهای افق زمانی به سمت ابتدا ($j=T,T-1,...,1$) حل می‌گردد.



شکل ۳. نمایش فرآیند مثال نمونه‌ای

۵. مثال عددی

در این قسمت نتایج حاصل از حل یک مثال نمونه، توسط مدل پیشنهادشده ارایه می‌شود. در این مثال اشاره به بخشی از فرآیند تولید مواد شیمیایی شده است. فرآیند شامل سه واحد است. مدل شبکه‌ای توصیف‌کننده فرآیند در شکل (۳) نمایش داده شده است. در گام اول جریان خوراک وارد شده به فرآیند شکل (۳) به واحد ۱ می‌رسد. محصول بدست آمده از این واحد به صورت دو سیال به واحد ۲ و ۳ ارسال می‌شود. خروجی واحد ۲ شامل دو محصول است. هر دو محصول به صورت مایع درون مخازن ۱ و۲ ذخیره‌سازی شده و بخشی از آنها به بازار عرضه می‌گردد محصول جامد بدست آمده از واحد ۳ قبل از ارسال به مشتری در انبار ذخیره سازی می‌شود. سیاست برآن است، زمانی برنامه‌ریزی تولید انجام می‌گردد که میزان موجودی درون انبار به صفر رسیده باشد. کارشناسان تولید و بهره‌برداری با توجه به عوامل کیفیت و مشخصات و پارامتر، درصد تفکیک حین فرآیند، تنظیمات فرآیندها و قابلیت اطمینان تجهیزات سه سناریو برای تبدیل مواد به محصولات مطابق جدول (۲) پیشنهاد کرده‌اند.

پس تعداد حالات مدل فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف شامل سه حالت است. ماتریس احتمال انتقال بین این سه حالت، در طی زمان یک دوره زمانی به صورت زیر تخمین زده شده است:

$$P^1=\begin{bmatrix}0.45 & 0.43 & 0.12\\ 0.17 & 0.57 & 0.26\\ 0.08 & 0.43 & 0.49\end{bmatrix}$$

جدول۲ . درصد خروجی واحدها

	y^1	y^2	y^3
درصد انحراف از استاندارد	+%۱۰	%0	-% ۱۰
محصول S1	۰/۹۳۳۴	۰/۸۴۰۰۶	۰/۷۵۶۰۰۵۴
محصول S2	۰/۰۰۱۰۶	۰/۰۰۰۹۵۴	۰/۰۰۰۸۵۹
محصول S3	۰/۰۷۷۸۲	۰/۰۷۰۰۳۸	۰/۰۶۳۰۳۴
محصول S4	۰/۹۱۳۶	۰/۸۲۲۲۴	۰/۷۴۰۰۱۶

در جدول (۳) داده‌های ورودی مربوط به پارامترهایی که در طول زمان ثابت هستند، طبقه‌بندی شده است. میزان تقاضا هر محصول (به ازای تن در روز)که توسط مشتری از پیش سفارش داده شده است، در جدول (۴) برای چهار دوره زمانی نشان داده شده است. برخی از محدودیت‌های فنی مدل شبکه مثال نمونه‌ای به صورت روابط (۲۱) تا (۲۶) آورده شده است

$$10000 \le QF_{u\,1,t} \le 75000 \quad \forall t \in \{j, j+1, \ldots, r\} \quad (21)$$

$$8000 \le QF_{u\,2,t} \le 45000 \quad \forall t \in \{j, j+1, \ldots, r\} \quad (22)$$

$$12000 \le QF_{u\,3,t} \le +\infty \quad \forall t \in \{j, j+1, \ldots, r\} \quad (23)$$

$$0 \le Vol_{tank\,1,t} \le 10000000 \quad \forall t \in \{j, j+1, \ldots, r\} \quad (24)$$

$$0 \le Vol_{tank\,2,t} \le 10000000 \quad \forall t \in \{j, j+1, \ldots, r\} \quad (25)$$

$$\varphi_{u\,2,s\,4,u\,3,t}.60.75 \le Q_{u\,2,s\,4,u\,3,t} \le \varphi_{u\,2,s\,4,u\,3,t}.1039 \quad \forall t \in \{j, j+1, \ldots, r\} \quad (26)$$

روش حل برنامه‌ریزی تولید احتمالی استفاده از مدل برنامه‌ریزی پویا برگشتی است. برای این منظور، مدل برنامه‌ریزی خطی شامل روابط (۱۱) تا (۲۶) را طبق الگوریتم برنامه‌ریزی پویای احتمالی نشان داده شده در شکل (۴) تا بدست آوردن تمامی خروجی‌ها به کار گرفته شده است.

۵-۱. الگوریتم حل برنامه‌ریزی پویای احتمالی

به منظور تشریح الگوریتم (شکل۴) و نمایش مراحل به کارگیری ماتریس انتقال فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف گسسته- زمان، مثالی ذکر شده است. در نظر است که دوره دوم (*j=2*) و در سناریو دوم (*i=2*) تصمیم‌سازی آغاز شده است. از آنجا که مقدار r برابر j می‌گردد، افق محاسبه برنامه‌ریزی خطی تنها یک دوره (دوم) است. ماتریس انتقال $\emptyset_{\text{im}}$ از به توان رسیدن یکبار P حاصل شده است. حاصلضرب احتمالات محاسبه شده از انتقال انتهای افق زمانی دوم به سوم در مقادیر پارامترهای بهینه دوره سوم (بدلیل ماهیت رویکرد پویای بازگشتی مقادیر بهینه دوره سوم و چهارم پیش از این محاسبه شده است) امید ریاضی این پارامترهای غیر قطعی درمدل برنامه‌ریزی خطی جایگذاری و مقدار عددی ۱۴۷۵۵۹ را به عنوان سود نهایی گزارش می‌گردد.

سپس بدلیل آنکه مقدار r (برابر ۲) با مقدار T (تعداد کل دوره‌ها ۴) برابر نیست، حلقه اول تکرار می‌گردد و مقدار t جدید برابر ۲ و ۳ می شود. در این حالت افق زمانی برنامه‌ریزی خطی دو دوره است که ماتریس انتقال $\emptyset_{\text{im}}$ از به توان رسیدن دو مرتبه P حاصل شده است. در این حالت امید ریاضی پارامترهای دوره چهارم حاصل شده از ماتریس انتقال جدید نشان می‌دهد که بعد از محاسبه مدل ریاضی سود نهایی برابر۱۶۳۲۶۰/۱ است. چون این سود از تصمیم قبل (۱۴۷۵۵۹) بیشتر است، به عنوان ملاک ذخیره شده و به مقدار r یک واحد اضافه می‌شود. ادامه این الگوریتم نشان می‌دهد که سود حاصل از تصمیم دو دوره (۱۶۳۲۶۰/۱) از مقدار سود افق سه دوره (دوم و سوم و چهارم) نیز بیشتر است.

با ادامه این الگوریتم، نتایج بهینه حاصل از حل مثال در جدول (۵) گزارش شده است. از اطلاعات گزارش شده در جدول (۵) بهترین تصمیم تولید در هر دوره زمانی، حاصل شده است. برای مثال اگر در ابتدای دوره زمانی اول،کارشناسان و مهندسان نت وضعیت فرآیند را در سناریو اول (y^1) تخمین زنند، آنگاه بهترین تصمیم تولید ثابت نگه‌داشتن میزان خوراک ورودی به میزان ۴۴۲۲۲/۱۴ تا سه دوره زمانی بعد است. به عبارت دیگر برای کسب حداکثر سود ۲۱۳۱۵۷ واحد پولی تا پایان دوره چهارم میزان خوراک باید تا سه دوره ثابت باشد؛ اما در ابتدای دوره چهارم دوباره با توجه به سناریو نشان دهنده وضعیت فرآیند دوباره میزان خوراک تغییر می‌کند.

به منظور ذکر مثال دیگر، با توجه به نظر کارشناسان ابتدای دوره زمانی اول،سناریو سوم (y^3) برای فرآیند تشخیص داده شده است؛ بهترین تصمیم زمان‌بندی تولید تنظیم میزان خوراک ورودی به میزان ۵۵۰۸۸/۱۶ است تنها برای همان دوره زمانی است.

توجه به احتمالات انتقال در دوره‌های زمانی بعد محاسبه می‌کند که سود حاصل شده تا پایان دوره چهارم برابر۱۹۶۵۲۶/۳است. در ابتدای دوره دوم اگر سناریو تغییر نکند، بهترین اقدام افزایش میزان خوراک فرآیند تا مقدار ۶۵۸۰۷/۳۳ است. اما اگر تشخیص کارشناسان تغییر وضعیت فرآیند به سناریو دوم (y^2) باشد، آنگاه بهترین اقدام برای سود حداکثر ثابت نگه داشتن میزان خوراک فرآیند به مقدار ۴۶۲۶۹/۱۴ برای دو دوره زمانی دوم و سوم است. در ادامه تصمیم بعدی به ابتدای دوره چهارم جهش می‌یابد. و این انتخاب بهترین تصمیم تا پایان افق زمانی ادامه می‌یابد.

جدول ۳. پارامترهای ورودی

Cpet f	CPS4	CPS3	λ_p	Cinv tank1	Cinv tank2	Hol p
۰/۷	۱/۳	۰/۷۶	۲/۵	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲

جدول ۴. میزان تقاضای محصولات در طول دوره

دوره زمانی/ محصول	t=۱	t=۲	t=۳	t=۴
D_P	۲۸۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۳۸۰۰۰
Dem_{S3}	۱۰۰۰	۸۰۰	۹۵۰	۱۱۴۰
Dem_{S4}	۹۸۰۰	۱۴۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۲۰۰۰

۵-۲. تحلیل نتایج کسب شده

در این قسمت نتایج حاصل از مدل پیشنهادی را با رویکرد برنامه-ریزی احتمالی مورد قیاس قرار گرفته شده است. جدول (۶) نمایشگر نتایج حاصل از حل مثال عددی ذکر شده، که از طریق رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی به کار گرفته شده در مقاله چنگ و همکاران فرمول‌بندی و حل شده است[۲۶].

نتایج حاصل از حل مدل برنامه‌ریزی احتمالی نشان دهنده مقدار ۲۱۲۷۴۳/۱ واحد پولی سود بعد از اجرای برنامه‌ریزی تولید است.

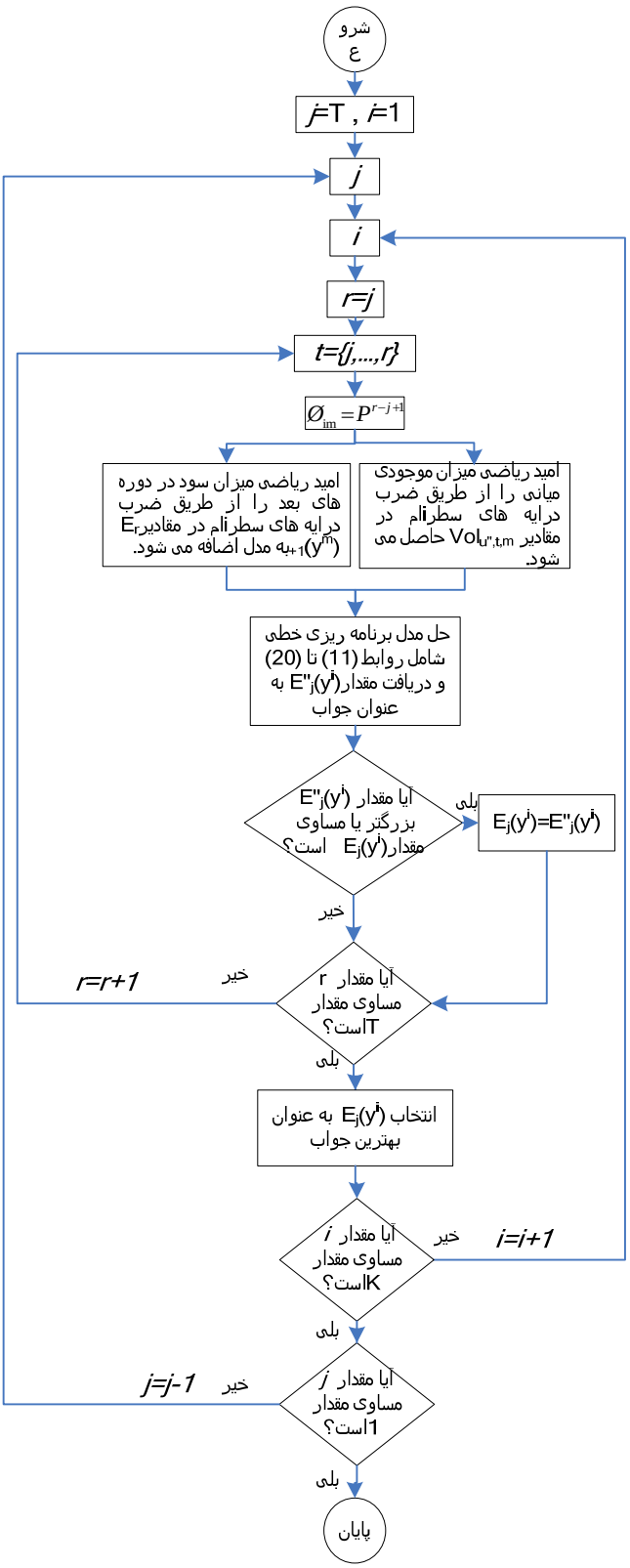
به منظور مقایسه این دو رویکرد به نظرات کارشناسان و مهندسان نت رجوع می‌شود. گزارش سالیانه وضعیت فرآیند را در دوره اول طبق سناریو سوم (y^3) دوره دوم و سوم وجهارم به ترتیب سناریوهای دوم، سوم و اول گزارش شده است؛ که مقدار اسمی کسب سود برابر ۲۰۹۹۶۵/۹ واحد پولی در طول چهار دوره است. حال با توجه به شرایط مطرح شده میزان کسب منفعت از طریق برنامه‌ریزی احتمالی مقدار ۱۸۸۵۴۵/۴ واحد پولی است. در این پژوهش بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی پویای احتمالی پیشنهاد شده، این مقدار تا مقدار ۱۹۹۱۵۲/۲ افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر از طریق رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی در ادبیات موضوع تنها ۸۹/۸۰ درصد از توان اسمی بهره‌برداری می‌گردد که این رقم با بکارگیری مدل پیشنهادی ۵/۰۵ درصد بهبود ایجاد می‌شود و این درصد به ۹۴/۸۵ ارتقا می‌یابد. از آنجا که غالبا حجم تولید درصنایع فرآیندی بالاست، میزان پنج درصد (سودی معادل با ۱۰۶۰۶/۸ واحد پولی) رقمی قابل توجه برنامه‌ریزان و مدیران صنایع فرآیندی است.

از جمله نتایج فرعی که از نوآوری این پژوهش را تقویت می‌کند ، میزان سرمایه‌گذاری و کسب منفعت در تغییر حالات فرآیند است.

به عنوان مثال مهندسان با توجه به اطلاعات جدول (۵) در می‌یابند که برای کسب منافع بیشتر نیاز به نگهداری فرآیند در سناریوهای پایین‌تر دارند. این اختلاف درآمد می‌تواند میزان هزینه‌های سرمایه-گذاری آنها را در دوره‌های بعد پیشنهاد کند. البته قابل ذکر است این تخصیص هزینه و انجام اقدامات پیشگیرانه تنها احتمالات گذار بین حالات را به سمت بهبود تغییر می‌دهد. به هر حال، نتایج این رویکرد چارچوبی را برای برنامه‌ریزی اداره نگهداری و تعمیرات و بخش تامین قطعات یدکی و مواد را بدست می‌آورد.

۶. جمع بندی

در این مقاله، از مدل زنجیره ماکوف به منظور تعیین سطح بهینه تولید در صنایع فرآیندی استفاده شده است. برای این منظور، مدل برنامه‌ریزی خطی پویای احتمالی را برای مساله تولید مدل‌های شبکه‌ای فرمولبندی شده است. تابع هدف مدل پیشنهادی حداکثرسازی سود که شامل درآمدهای حاصل از فروش و هزینه-های نگهداری موجودی معرفی شد. حالات انتقال‌های موجود در مدل مارکوف نشان دهنده وضعیت میزان خروجی‌های واحدها است که کارشناسان صنعتی عواملی را برای میزان و مدت تغییر حالات برشمرده اند. هدف اصلی این پژوهش ارایه رویکرد حل برنامه‌ریزی پویا برای حل مدل‌های تولید شبکه‌های فرآیندی است. مدل پیشنهادی از طریق رویکرد بازگشتی برنامه‌ریزی پویا و رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی معرفی شده در ادبیات موضوعف برای نمونه‌ای عددی مثال زده شده است. مقایسه این دو رویکرد برنامه‌ریزی با مقادیر گزارش شده از وضعیت فرآیند در طول دوره‌های زمانی نشان داد که رویکرد پیشنهاد شده نسبت به روش‌های اخیر، مقدار پنج درصد در سود کسب شده بهبود ایجاد می‌کند. از دیگر دلایل و مزیت‌های رویکرد پیشنهاد شده بهره‌گیری از مزایا پویایی سیستم است، که این خود اثر تغییرات شدید در شرایط و پارامترهای درون این دسته از صنایع تحت کنترل قرار می‌دهد.



شکل ۴. الگوریتم برنامه‌ریزی پویای احتمالی

پی نوشت

1. Petrochemicals
2. Cement
3. Fertilizers
4. Rubber
5. Food Processing
6. Pharmaceuticals
7. Scenario
8. Scenario
9. Manufacturing Execution Systems
10. Binary Integer Linear Programming
11. Yield

مراجع

[1] U. S. Karmarkar and K. Rajaram, "Aggregate production planning for process industries under oligopolistic competition," European Journal of Operational Research, (2012), Vol. 223, pp. 680-689.

[2] L. Tang, P. Che and J. Liu, "A stochastic production planning problem with nonlinear cost," Computers & Operations Research, (2012), Vol. 39, pp. 1977-1987.

[3] X. Liu and Y. Tu, "Production planning with limited inventory capacity and allowed stockout," Int. J. Production Economics, (2008), Vol. 111 , pp. 180–191.

[4] A. A. Levis and L. G. Papageorgiou, "A hierarchical solution approach for multi-site capacity planning under uncertainty in the pharmaceutical industry," Computers and Chemical Engineering, (2004), Vol. 28 , pp. 707–725.

[۵] مختاری، هادی.، نخعی، عیسی. و امین‌ناصری، محمدرضا.، «مدلسازی و حل تحلیلی مسأله برنامه ریزی ظرفیت و زمانبندی تولید یکپارچه :استخراج کران پائین و طراحی یک الگوریتم شاخه و کران کارا »، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۹۲)، جلد۲۴، شماره۲، صفحه ۱۳۹-۱۱۸.

[6] V. Goel and I. E. Grossmann, "A stochastic programming approach to planning of offshore gas field developments under uncertainty in reserves," Computers and Chemical Engineering, (2004), Vol. 28, pp. 1409–1429.

[7] M. Ierapetritou, E. N. Pistikopoulos and C. A., "Floudas Operational planning under uncertainty.," Computers & Chemical Engineering, (1994), Vol. 18, pp. 163-189.

[8] C. G. Silvaa, J. Figueirab, J. Lisboab and S. Barmane, "An interactive decision support system for anaggregate production planning model based on multiple criteria mixed integer linear programming," Omega, (2006), Vol. 34, pp. 167–177.

[9] K. Das and S. Sengupta, "A hierarchical process industry production distriution planning model," Int. J. Production Economics, (2009), Vol. 117, pp. 402–419.

[۱۰] کاظم‌زاده، رضا.، اسکندری، حمیدرضا. و کاکاوند، وحید.، «بررسی سناریوی‌های مختلف اشتراک اطلاعات در زنجیره تامین با استفاده از شبیه‌سازی »، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۹۲)، جلد۲۴، شماره۳، صفحه ۲۹۸-۲۸۴.

[۱۱] مظاهری، علی.، کرباسیان، مهدی.، سجادی، سیدمجتبی.، شیرویه‌زاد، هادی. و عابدی، سعید. «ارائه مدلی جهت بهینه‌سازی زنجیره تامین یکپارچه با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی چند هدفه »، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۹۳)، جلد۲۵، شماره۲، صفحه ۲۰۴-۱۸۶.

[۱۲] وریانی ، آسیه. و فتاحی ، پرویز، « تعیین مقدار بهینه تولید در یک سیستم تولید دو سطحی با تقاضای احتمالی »، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۹۲)، جلد۲۴، شماره۱، صفحه ۶۶-۵۶.

[13] Cao.C., X. Gu and Z. Xin, "Chance constrained programming models for refinery short-term crudeoil scheduling problem oil schedhling problem," Applied Mathematical Modelling , (2009), Vol. 33, pp. 1696–1707.

[14] S. N. J. Maiti, S. Eberhardt, P. J. Kundu, B. Cadenhouse and D. J. Adams, "How to efficiently plan a grassroots refinery," Hydrocarbon Processing, (2001).

[15] D. LI, L. LIU, Z. W. and G. RONG, "Material-flow Modeling Technolgy and Its Application in Manufacturig Execution Systems of Petrochemical Industry," Chinese Journal of Chemical Engineering, (2008), Vol. 16, pp. 71-78.

[16] A. Nelson and S. Kavuri, "Integration of generative and evaluative models for production scheduling of lube oil plants in a petroleum refinery," Applied Mathematical Modelling, (2009), Vol. 33, pp. 1213–1227.

[17] S. Pitty, W. Li, A. Adhitya, R. Srinivasan and I. Karimi, "Decision support for integrated refinery supply chains part 1. Dynamic simulation," Computers and Chemical Engineering, (2008), Vol. 32 , pp. 2767–2786.

[18] C.-F. Chien, "Coordinated capacity migrationan dexpansion planning for semonductor manufacturing under dmand uncertainties," Int. J. Production Economics, (2012), Vol. 135, pp. 860–869.

[19] B. Atasoy, R. Gullu and T. Tan, "optimal inventory policies with nonststionary supply disruptions and advance supply information," Decision Support Systems, Vol. 53, pp. 269–281.

[20] Q. hong Zhao, S. Chen, S. Leung and K. Lia, "Integration of inventory and transportation decisions in a logistics

system," Transportation Research Part E, (2010), Vol. 46, pp. 913–925.

[21] S. Ioannidis, "An inventory and order admission control policy for production systems with two customer," Int. J. Production Economics, (2011), Vol. 131, pp. 663–673.

[22] K. K. Yin, H. Liu and N. E. Johnson, "Markovian inventory policy with application to the paper industry," Computers and Chemical Engineering, (2002), Vol. 26, pp. 1399-1413.

[23] K. K. Yin, H. Liu and Y., G., "Stochastic models and numerical solutions for production planning with applications to the paper industry," Computers and Chemical Engineering, (2003), Vol. 27 , pp. 1693-1706.

[24] Z. Zhu, L. Liu and J. Wang, "Optimization of China’s strategic petroleum reserve policy :A Markovian decision approach," Computers & Industrial Engineering, (2012), Vol. 63, pp. 626–633.

[25] S. M. S. Neiro and J. M. Pinto, "SUPPLY CHAIN OPTIMIZATION OF PETROLEUM REFINERY COMPLEXES," in proceedings Foundations Of computer-Aided Process Operations(FOCAPO), (2003).

[26] K. Cheng Seong, "A Hybrid of Stochastic Programming Approaches with Economic and Operational Risk Management for Petroleum Refinery Planning under Uncertainty," University of Waterloo, Ontario, Canada, (2006).

[27] H. Qiying and Y. Wuyi, MARKOV DECISION PROCESSES WITH THEIR APPLICATIONS, New York: Springer Science , LLC, (2008).