

بهینه سازی شبکه انتقال جرم بوسیله تلفیق الگوریتم ژنتیک و روش SQP

سیروس شفیعی^۱, S.Domenech^۳, J.Paris^۲

۱ - دانشگاه صنعتی سهند-دانشکده مهندسی شیمی

E-mail: ssirous@yahoo.com

چکیده

شبکه های انتقال جرم عموماً متشکل از واحدهای انتقال جرم هستند و بیشتر برای حذف مواد آلوده کننده از فاضلابهای صنعتی بکار می روند. این مقاله یک روش جدید را برای ایجاد شبکه های انتقال جرم از طریق تلفیق الگوریتم ژنتیک و روش برنامه ریزی خطی یا غیر خطی (بسته به نوع مسئله) توصیف می کند. روش کدسازی برای الگوریتم ژنتیک یک فضای کامل جستجو را با در نظر گرفتن کلیه ترکیبهای متفاوت شبکه انتقال جرم ایجاد می کند بوسیله یک مثال کاربرد این روش در حل مسائل شبکه های انتقال جرم نشان داده خواهد شد.

واژه های کلیدی: شبکه انتقال جرم، الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی

مقدمه

اما صنایع شیمیائی در درجه اول با بهینه سازی صنایع موجود و تغییر بهینه آنها روبرو می باشند. "تصفیه نهائی" می تواند با استفاده بهینه از مواد موجود در پساب در فرآیندهای مربوطه انجام شود. از همین جا بحث شبکه های انتقال جرم برای تماس بهینه جریانهای مختلف با هدف استفاده حداکثر از پتانسیل موجود در جریانها پیش می آید. استفاده بالقوه از شبکه های انتقال جرم در موقعیتهای متفاوتی از قبیل آماده سازی خوراک تا بازیابی محصول و به حداقل رساندن تلفات مطرح می شود. ایجاد شبکه های انتقال جرم به روشهای متفاوتی انجام شده است. اولین تلاش الگوریتمیک به حداقل رساندن میزان مواد تصفیه کننده بود. [1]

در این کار از یک روش کاملاً مشابه پینچ استفاده شد و یک دستورالعمل دو مرحله ای بر اساس یک برنامه ریزی خطی^۳ با اعداد صحیح ابداع شد. این روش به بهینه سازی

عملیات انتقال جرم کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف شیمیائی دارد و شبکه های انتقال جرم^۱ برای کاستن از آلودگیهای پدید آمده در فرآیند به یک حد قابل قبول با ارزاترین قیمت به کار می روند. با افزایش توجه نسبت به ضایعات زیست محیطی و لزوم توجه به کاهش آلاینده ها و قوانین سخت تر از طرف دولتها برای فرآیندهای پاکیزه تر، صنعت دوراه را برای رسیدن به هدف در نظر دارد:

۱. طراحی یک فرآیند کاملاً جدید

۲. بهینه سازی فرآیند موجود با یک "تصفیه نهائی"^۲ برای

رسیدن به هدفهای زیست محیطی

روش اول می تواند جواب بهتری بدهد چرا که استفاده از

تکنولوژی جدید مثل چرخه جریانهای پساب

و تجهیزات مناسب تر، می تواند براحتی در نظر گرفته شود.

¹ Mass Exchange Network (MEN)

² End of pipe treatment

³ Linear Programming

و تعدادی جریان فقیر^۷ می باشد. انتگراسیون این جریانها با هدف خالص سازی جریانهای غنی و بازیابی حلالها با کمترین هزینه ثابت و جاری می باشد. مسئله MEN می تواند به صورت زیر مطرح شود:

- مجموعه ای از جریانهای غنی با دبی و ترکیب اولیه معلوم و ترکیب نهائی مطلوب اجزا.
- مجموعه ای از جریانهای فقیر (یا عوامل تصفیه کننده) با ترکیب اولیه و یک حد بالائی یا ترکیب خروجی اجزا و قیمت استفاده از آنها.
- مجموعه ای از روابط تعادلی برای توزیع ترکیبهای قابل انتقال بین جریانهای غنی و فقیر.

هدف ایجاد یک شبکه انتقال جرم است که جریانهای غنی و فقیر را با هم تماس داده و طرز قرار گیری هر مبدل جرمی در شبکه همراه با هزینه ثابت و جاری معلوم شود تا بتواند به مشخصه ها و اهداف فرآیندی دست یابد.

فرضهای زیر را هم داریم:

- ۱- دبی جرمی هر جریان در سراسر شبکه تقریباً ثابت می ماند.
- ۲- غلظت تعادلی جزئی که منتقل می شود وابسته به اجزای دیگر نیست.
- ۳- مبدلهای جرمی در نظر گرفته شده فقط از نوع مختلف الجهت^۸ هستند.
- ۴- انتقال جرم بین جریانهای غنی مجاز نیست.
- ۵- انتگراسیون حرارتی بین جریانها در نظر گرفته نمی شود.

۶- شبکه تحت فشار ثابت کار می کند.

فرض اول زمانی واقعی است که تغییرات ترکیب جریانها اندک باشد. و فرض دوم اشاره به رابطه تعادل خطی دارد که به ترکیبات دیگر وابسته نیست و البته این فرض به راحتی می تواند با تعریف یک رابطه تعادل

شبکه های انتقال جرم همراه با شبکه بازسازی و نیز شبکه انتقال جرم همراه با واکنش شیمیائی بسط یافت. [2],[3] محدودیت عمده این روش این است که نمی تواند هزینه تمام شده کلی بهینه را برای شبکه نهائی برآورد کند. چرا که پارامترهای هزینه ای در این روش به طور همزمان بهینه سازی نمی شوند. و علاوه بر آن یک روش سیستماتیک برای بدست آوردن شکل شبکه بدست نمی دهد. اخیراً مسئله برای شمول هزینه ثابت و همچنین هزینه جاری شبکه بسط داده شده که منتهی به یک برنامه ریزی غیرخطی^۱ می شود.

این مسئله و همچنین تکنیک "فضا حالت"^۲ و نیز روش "منحنی فرآیند"^۳ برای حل مسئله پیشنهاد شده است.

[4],[5],[6],[7]

افزودن پارامترهای شبکه به مسئله باعث افزودن متغیرهای صحیح به مسئله می شود که مسئله را تبدیل به یک برنامه ریزی غیر خطی با متغیرهای صحیح^۴ می کند و در نتیجه همه محدودیتهای مسئله باقی خواهد ماند.

در این مقاله روش جدیدی که از ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش برنامه ریزی خطی یا غیر خطی بدست آمده برای حل مسئله پیشنهاد می شود. استراتژی عمومی برای حل مسئله از دو مرحله تشکیل می شود و فرق اساسی این روش با روش MINLP استفاده از روش الگوریتم ژنتیک است که برای حل قسمت متغیرهای صحیح مسئله و یا در حقیقت برای پیدا کردن آرایش شبکه بهینه به کار می رود و مزیت این روش این است که در تله های بهینه محلی^۵ نمی افتد و در نهایت نیز بیش از یک جواب خوب برای مسئله بدست می دهد.

بیان مسئله

ایجاد شبکه های انتقال جرم شامل تعدادی جریان غنی^۶ که می تواند دارای اجزای غیرمطلوب یا ممنوع و یا با ارزش باشد

¹ Non Linear Programming

² State Space

³ Process Graph

⁴ Mixed Integer Non Linear Programming (MINLP)

⁵ Local Optima

⁶ Rich Stream

⁷ Lean Stream

⁸ Counter-Current

از تکرار^{۱۰} (به نام نسل^{۱۱}) ویا توانائی مورد انتظار ویا یک معیار روی پراکندگی جمعیت است. چند مزیت برای کاربرد الگوریتم ژنتیک وجود دارد:

- این روشها معمولاً یک جستجوی کلی را سامان می دهند و کمتر در تله های بهینه محلی به دام می افتند.
 - در پایان جستجو بیشتر از یک جواب برای مسئله موجود است.
- با توجه به دلایل بالا یک الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی شکل شبکه انتقال جرم به کار گرفته شد.

آرایش^{۱۲} شبکه انتقال جرم

آرایش به نحوی تعریف می شود که شامل کلیه تماسهای ممکن میان جریانهای غنی و فقیر با همه نوع حالت موازی و سری باشد.

تعریف چنین آرایشی از کار Papalexandri گرفته شده است: [4]

- هر تماس بالقوه بین جریان غنی و فقیر معادل یک مبدل جرمی بالقوه است. (تناظر یک به یک)
- هر جریانی که وارد شبکه می شود به تعداد واحدهای مبدل جرم تقسیم می شود.
- امکان وجود بیش از یک مبدل جرمی برای دو جریان در نظر گرفته می شود.
- قبل از هر مبدل جرمی بالقوه یک مخلوط کننده^{۱۳} جریان وجود دارد که جریانهای وارد شده از مبدلهای جرمی مختلف و تقسیم کننده اولیه جریان را جمع کرده و به مبدل جرمی می فرستد.

غیرخطی برداشته شود. دو فرض آخر اشاره به کاربرد یک رابطه تعادلی در طول کل شبکه دارند.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتمهای ژنتیک^۱ روشهای بهینه سازی تصادفی^۲ هستند که بر اساس قوانین بیولوژیکی انتخاب طبیعی^۳ عمل می کنند. [8],[9],[10],[11]

ایده اساسی GA عبارت از قرار دادن پارامترهای اساسی برای بهینه سازی در رشته هائی^۴ به نام کروموزوم است که شامل ژنها هستند. این پارامترها ممکن است اعداد حقیقی صحیح یا حتی اطلاعات پیچیده باشند. یک الگوریتم ژنتیک یک جمعیت^۵ کروموزوم را ایجاد کرده و با استفاده از عملگرهای مختلف شامل ترکیب^۶ و جهش^۷ و بر اساس توانائی^۸ هر کروموزوم نسل جدیدی را بوجود می آورد. می توان مجموعه متفاوتی از عملگرها و روشهای انتخاب را استفاده کرد. زمینه اصلی همه این روشها تصادفی بودن انتخاب و ایجاد کروموزومهای جدید است. توانائی هر کروموزوم نشانه ای از حد مقبولیت ویا مفید بودن جوابی است که در کروموزوم کد شده است.

در مطالعات بهینه سازی این توانائی غالباً مقدار تابع هدف^۹ به ازای پارامترهای معلوم است و نیز می تواند جواب مسئله برنامه ریزی خطی یا غیر خطی باشد که از طریق کروموزوم ایجاد

می شود. یک الگوریتم ژنتیک زمانی خاتمه می یابد که معیار داده شده توسط کاربر صدق کند. معمولاً تعداد معینی

¹ Genetic algorithms GA

² Stochastic

³ Natural Selection

⁴ Strings

⁵ Population

⁶ Cross-over

⁷ Mutation

⁸ Force

⁹ Objective Function value

¹⁰ Iteration

¹¹ Generation

¹² Configuration

¹³ Mixer

رشته^۲ کروموزوم که مساوی حاصل جمع متغیرهای بالاست مشخص می شود. چون هر متغیر جای ثابتی در رشته کروموزوم دارد هر رشته کروموزوم به سادگی تعبیر به یک آرایش خاص از شبکه انتقال جرم می گردد و بدین ترتیب کل شبکه مشخص می شود.

به عنوان مثال برای یک مسئله با دو جریان غنی و دو جریان فقیر طول رشته ۲۸ و متغیرهای زیر به تعداد ۲۸ عدد وجود خواهند داشت.

FRI₁₁, FRE₁₁, FRO₁₁, FRB₁₁₂, FPI₁₁, FPO₁₁, FPB₁₁₂,
 FRI₁₂, FRE₁₂, FRO₁₂, FRB₁₂₁, FPI₁₂, FPO₁₂, FPB₁₂₂,
 FRI₂₁, FRE₂₁, FRO₂₁, FRB₂₁₂, FPI₂₁, FPO₂₁, FPB₂₁₁,
 FRI₂₂, FRE₂₂, FRO₂₂, FRB₂₂₁, FPI₂₂, FPO₂₂, FPB₂₂₁

همینکه آرایش شبکه مشخص شد ایجاد شبکه انتقال جرم می تواند به صورت یک مسئله برنامه ریزی غیر خطی^۳ تعریف شود.

بنابر این روش کلی به این صورت است که یک شبکه مشخص انتقال جرم توسط روش الگوریتم ژنتیک پیشنهاد می شود و این شبکه توسط روش برنامه ریزی غیر خطی بهینه سازی شده و مقدار تابع هدف که اینجا هزینه کلی است بعنوان توانائی آن شبکه در الگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن نسل جدیدتر مورد استفاده قرار می گیرد و با تکرار این چرخه بالاخره شبکه بهینه بدست می آید.

ملاحظات

در روش الگوریتم ژنتیک ابتدا رشته های کروموزوم به صورت تصادفی پر می شوند. هر کروموزوم به برنامه NLP معرفی شده و مقدار تابع بهینه سازی معرفی شده بوسیله NLP به عنوان توانائی کروموزوم در عملیات الگوریتم ژنتیک استفاده می شود. قبل از ورود به برنامه NLP کلیه کروموزومها تست می شوند تا نشانگر یک شبکه عملی انتقال جرم باشند. الگوریتم ژنتیک به تعداد "معلوم" نسل جدید تولید می کند. روش پیشنهاد شده می تواند به صورت زیر نشان داده شود.

• بعد از هر مبدل جرمی بالقوه یک تقسیم کننده جریان وجود دارد که جریان را به مخلوط کننده نهائی ویا به مبدلهای جرمی دیگر می فرستد.

برای مدل سازی آرایش شبکه بالا متغیرهای صحیح زیر تعریف می شوند که در آن اندیس i نشانگر شماره جریان غنی و اندیس j نشانگر شماره جریان فقیر می باشد.

• FRE_{ij}: نشانگر وجود مبدل جرمی بالقوه بین جریان غنی i و جریان فقیر j می باشد.

• FRI_{ij}: نشانگر وجود جریان غنی از تقسیم کننده اولیه به سمت مبدل جرمی بالقوه بین جریان غنی i و جریان فقیر j می باشد.

• FRO_{ij}: نشانگر وجود جریان غنی از مبدل بالقوه جرم i به سمت مخلوط کننده نهائی جریان غنی است.

• FRB_{ijk}: نشانگر وجود جریان غنی از مبدل جرمی بالقوه i به سمت مبدل جرمی بالقوه ik می باشد. ($k \neq j$)

• FPI_{ij}: نشانگر وجود جریان فقیر از تقسیم کننده اولیه جریان فقیر به سمت مبدل جرمی بالقوه i می باشد.

• FPO_{ij}: نشانگر وجود جریان فقیر از تقسیم کننده بعد از مبدل جرمی بالقوه i به سمت مخلوط کننده نهائی جریان فقیر می باشد.

• FPB_{ijk}: نشانگر وجود جریان فقیر از مبدل جرمی بالقوه i به سمت مبدل جرمی jk می باشد. ($k \neq i$)

هر کدام از متغیرهای صحیح بالا می توانند اعداد یک یا صفر را اختیار کنند که نشانگر وجود و یا عدم وجود جریان خواهد بود. برای m جریان غنی و n جریان فقیر تعداد $n \times m$ متغیر FRI و $m \times n$ متغیر FRE و $m \times n$ متغیر FRO و $m \times m \times (n-1)$ متغیر FPI و $m \times n$ متغیر FPO و $m \times n \times (m-1)$ متغیر FPB وجود خواهد داشت. در این صورت تعداد کل متغیرهای صحیح $(m+n+3) \times n \times m$ خواهد بود. با تعیین تعداد جریانهای غنی و فقیر طول

² String

³ Nonlinear Programming NLP

¹ Splitter

دبی جرمی و مشخصات روی غلظتها ی دو جریان غنی از مس در جدول یک داده شده است.

جدول ۱. مشخصات جریانهای غنی

جریان	توصیف	دبی (Kg/s) Y_s	Y_t
R1	amm. Solution	0.25	0.13
R2	rinsewater	0.1	0.06

دو نوع محلول استخراج برای بازیابی مس پیشنهاد شده است.

LIX63 (α هیدروکسی اکسیم الیفاتیکی^۲) و P1 (β)

هیدروکسی اکسیم آروماتیکی^۳). داده ها در مورد غلظت

مس و هزینه این دو جریان فقیر در جدول ۲ داده شده است.

جدول ۲- مشخصات جریانهای فقیر

جریان	توصیف	X_s	X_t	هزینه (\$/Kg)	هزینه سالیانه (\$/KgYr)
S1	LIX63	0.25	.13	0.01	58,680
S2	P1	0.1	.06	.12	704,160

در دامنه غلظت مس مربوطه می توان روابط تعادلی پائین را برای غلظت مس در جریانهای غنی و فقیر در نظر گرفت:

$$R1,S1 : y1=0.734x1+0.001$$

$$R2,S1 : y2=0.734x1+0.001$$

$$R1,S2 : y1=0.111x2+0.008$$

$$R2,S2 : y2=0.148x2+0.013$$

دو نوع مبدل جرمی در نظر گرفته می شود. برج با سینی های مشبک^۴ برای تماس با جریان فقیر اول و برج آکنه برای تماس با جریان فقیر دوم. قیمت ثابت به سال شده برج سینی دار بر اساس تعداد سینی ها و قیمت ثابت به سال شده برج آکنه بر اساس ارتفاع معادل می باشد. قیمت های ثابت به سال شده در جدول ۳ نشان داده شده اند.

جدول ۳- قیمت به سال شده برجها

نوع برج	هزینه به سال شده
برج سینی دار	4,552 Nst \$/Yr
برج آکنه	4,245H\$/Yr

² Aliphatic α -hydroxyoxime

³ Aromatic β - hydroxyoxime

⁴ Perforated Plate Column

- شروع
- جمعیت کروموزومها را ایجاد کنید
- کروموزومها را از طریق برنامه NLP ارزیابی کنید و توانائی هر کدام را مشخص کنید
- در صورتی که معیار خاتمه برنامه صدق نمی کند حلقه زیر را تکرار کنید
- شماره نسل را به مقدار یک واحد اضافه کنید
- والدین را برای نسل بعدی انتخاب کنید(بر اساس توانائی بدست آمده برای کروموزومها)
- برای بدست آوردن نسل جدید، ترکیب، ترکیب جهشی را روی والدین انتخاب شده انجام بدهید.
- فرزندان بدست آمده را ارزیابی کنید.
- پایان تکرار
- پایان

چون ممکن است در طی فرآیند حل مسئله جوابهای خوب از نسلی به نسل دیگر ناپود شوند و برای جلوگیری از نابودی بهترین جوابها بهترین جواب در هر نسل نگهداری می شود. از نسلی به نسل دیگر ممکن است آرایشهای مشابه شبکه ایجاد و باز تولید شوند که برای این خاطر و برای کم کردن از حجم محاسبات زیر برنامه های خاصی برای ارزیابی شبکه های مشابه بدون اجرای برنامه NLP پیش بینی شده است. کلیه برنامه ها به زبان فرترن نوشته شده و برای برنامه ریزی غیر خطی از روش بهینه سازی^۱ SQP استفاده شده است.

روش پیشنهاد شده برای ایجاد شبکه انتقال جرم توسط یک مثال و از تکنولوژی مس تشریح می شود. [13]

برای تحلیل مس از محلولهای آمونیاکی استفاده می شود و بهترین راندمان در ترکیبهای وزنی بین ۱۰ و ۱۳ در صد بدست می آید برای داشتن غلظتهای مطلوب مس در محلول، مس بایستی به طور مرتب از محلول جدا شود. مس همچنین بایستی از آب شستشوئی که صفحات خورده شده را می شوید به خاطر مسائل زیست محیطی حذف شود. داده های

¹ Successive Quadratic Programming

روشهای قبلی مسئله را به دو مرحله تجزیه نمی کند بلکه هر دو قسمت شکل ساختاری شبکه و میزان مواد تصفیه کننده و یا هزینه ثابت و هزینه جاری را بطور همزمان بهینه می کند. در حقیقت با این روش مسئله MINLP تبدیل به مسئله NLP می شود و با این ساده سازی کلیه مشکلات مربوط به مسئله MINLP برطرف می گردد و نیز مزایای الگوریتم ژنتیک که داشتن بیش از یک جواب خوب برای مسئله و پرهیز از تله های بهینه محلی است وجود خواهد داشت.

فهرست علائم

G: دبی جریان غنی (Kg/sec)

H: ارتفاع تئوریک هر مرحله تعادلی در برج آکنه (m)

Nst: تعداد مراحل تعادلی استخراج در برج سینی دار

Ri: اسم و شماره جریان غنی

Sj: اسم و شماره جریان فقیر

x: غلظت جریان فقیر

Xs: غلظت اولیه جریان فقیر

Xt: حد بالایی غلظت جریان فقیر

y: غلظت جریان غنی

Ys: غلظت اولیه جریان غنی

Yt: غلظت نهایی یا مطلوب جریان غنی

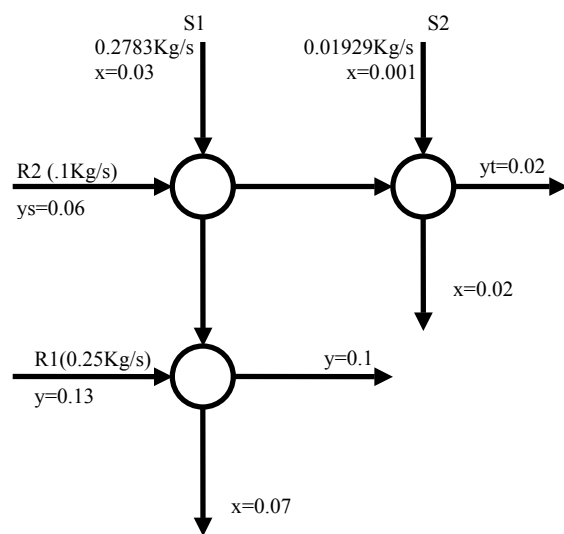
مراجع

- [1] El-halwagi M., M. Manousiouthakis V., "Synthesis Of Mass-Exchange Networks", AIChE Journal, Vol. 35, No.8, pp. 1233, 1989
- [2] El-halwagi M., M. Manousiouthakis V. "Automatic Synthesis Of Mass-Exchange Networks With Single-Component Targets", Chemical Engineering Science, Vol. 45, No. 9 pp.2813-2831, 1990b
- [3] El-halwagi M., M. Manousiouthakis V. "Simultaneous Synthesis Of Mass Exchange

جواب پیشنهاد شده در مقالات بر اساس مقدار کمینه استفاده از محلولهای استخراج برابر است با \$ 27,758/yr و هزینه ثابت برابر است با \$ 95,695/yr [12]

روش پیشنهادی برای حل مسئله فوق بکار رفته و هزینه های کلی همراه با آرایش شبکه به طور همزمان بهینه سازی شده است. مسئله شامل ۲۸ متغیر صحیح و ۵۲ متغیر حقیقی می باشد و شامل ۳۶ معادله و ۸ نامعادله می باشد. شبکه بدست آمده در شکل (۱) نشان داده شده است.

این شبکه قیمت کلی را \$ 48,134 برآورد می کند که \$29,914 آن برای هزینه محلولهای استخراج صرف می شود. توجه کنید که کل هزینه سالانه با روش پیشنهادی به میزان ۶۱ درصد کاسته شده و در عوض هزینه محلولهای استخراج به میزان ۸/۷ درصد افزایش پیدا کرده است. در حالی که از هزینه تجهیزات به میزان ۸۰ درصد کاسته شده است.



شکل ۱- آرایش شبکه بدست آمده توسط روش پیشنهادی

نتیجه گیری

یک روش حل جدید برای مسئله شبکه انتقال جرم که تلفیق الگوریتم ژنتیک با مسائل برنامه ریزی خطی یا غیر خطی است (بسته به نوع مسئله) پیشنهاد می شود. این روش مثل

- And Regeneration Networks”, *AIChE Journal*, Vol. 36, No.8, pp. 1209, 1990a
- [4] Papalexandri K. P., Pistikopoulos E.N., Floudas A., “Mass Exchange Networks for waste minimization : A simultaneous approach”, *Trans IChemE*, Vol. 72, PP. 279-194, 1994
- [5] Gupta A. Manousiouthakis V., “Minimum Utility Cost Mass-Exchange Networks With Variable Single Component Supplies And Targets”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 32, PP. 1937-1950, 1993
- [6] Bagajewicz, M. and Manousiouthakis, V., “On The Mass/Heat Exchange Network Representation Of Distillation Networks”, *AIChE Journal*, Vol. 38, No.11, pp. 1769, 1992
- [7] Lee S., and Park S., “Synthesis of Mass Exchange Network Using Process Graph Theory”, *Computers and chemical Engineering*. Vol. 20, Suppl., pp. S201-s205, 1996
- [8] Beasley, D. Bull, D.R. and M.R., “An Overview of Genetic Algorithms : Part 1, Fundamentals, *Univ. Comput.* 15(2), pp58-69, 1993
- [9] Goldberg, D.E., “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning” Addison-Wesley, Reading, MA, 1989
- [10] Holland, J.H. “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, MIT Press, Cambridge, M.A., 1975
- [11] Michalewicz, Z., “Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution Programs”, Springer, New York, 1994.
- [12] El-halwagi M., M. Manousiouthakis V., “Synthesis Of Reactive Mass-Exchange Networks”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 47, No. 8 pp.2113-2119, 1992