



## بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم NSGA-II

مهران شایگان<sup>۱\*</sup>، عباس علیمحمدی<sup>۲</sup>، علی منصوریان<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری GIS، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۲ و ۳. استادیار گروه مهندسی GIS، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۹/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۶/۱۵

### چکیده

الگوی کاربری اراضی به واسطه افزایش فعالیت‌ها و دخل و تصرف‌های بشر بر زمین به‌منظور برآوردن نیازهای مختلف، دائماً در حال تغییر است. بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی همانا یافتن بهترین الگوی ممکن با در نظر گرفتن نیازهای حاکم بر مقوله تخصیص است. اغلب جست‌وجوها و بهینه‌سازی‌های کاربری اراضی در دنیای واقعی، ماهیتاً دربردارنده چندین هدف‌اند. در این مطالعه قابلیت الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نخبه‌گرا (NSGA-II) با طراحی و استفاده از دو نوع عملگر تقاطع یکنواخت (UC) و عملگر تقاطع دوبعدی (TDC) برای بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی با اهداف چندگانه در بخشی از حوضه طالقان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. داده‌های به‌کاررفته شامل نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۲، توپوگرافی، خاک‌شناسی، اطلاعات مربوط به میزان فرسایش خاک و بازدهی اقتصادی از منطقه مورد مطالعه بوده است. اهداف مورد نظر شامل میزان فرسایش، میزان رواناب، تناسب اراضی، میزان فشردگی - سازگاری و بازدهی اقتصادی است. مدل طراحی شده با دو جمعیت اولیه متفاوت اجرا گردید. بار اول با جمعیت کاملاً تصادفی و بار دوم با تولید جمعیت اولیه تصادفی راهنمایی شده که در آن نسبت مساحت کاربری‌های مختلف تعیین شده بود. نتایج نشان داد کارکرد عملگرهای تقاطع کاملاً تحت تأثیر شرایط اولیه قرار دارد و عملگر UC فاقد توانایی مناسب در ایجاد همگرایی کلی است. همچنین استفاده از تقاطع TDC با جمعیت اولیه راهنمایی شده، همگرایی را بسیار افزایش داد و موجب بهبود نتایج گردید. به لحاظ پیوستگی قطعات کلاس‌های مختلف کاربری نیز عملگر TDC بهتر از UC کارکرد داشته است. نتایج این مطالعه نشان داد که پس از بهینه‌سازی کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه، علاوه بر کاهش فرسایش خاک، میزان سوددهی کلی نیز افزایش یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** بهینه‌سازی چندهدفه، کاربری اراضی، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نخبه‌گرا.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر (عج)، تقاطع میرداماد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری، تلفن ۸۸۷۸۶۲۱۲

## ۱- مقدمه

مدیریت کاربری اراضی مستلزم ارزیابی دقیق و درست پتانسیل اراضی در خصوص خدمات مورد نیاز جامعه است. از این رو اولویت‌بندی کاربری اراضی باید بر اساس ارزیابی مناسب از همه استفاده‌های ممکن هر واحد زمین باشد (Huston, 2006). مدیریت کاربری اراضی را می‌توان فرایند تخصیص استفاده‌های مختلف اراضی نظیر صنعت، کشاورزی، جنگل یا منطقه حفاظت‌شده به واحدهای مختلف اراضی به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر مدیران و تصمیم‌گیرندگان باشد (Stewart, 2004). خاک از مهم‌ترین منابع طبیعی هر کشور است. فرسایش خاک نه تنها سبب فقیر شدن آن و متروک شدن مزارع می‌گردد بلکه با رسوب مواد در آبراهه‌ها، مخازن، سدها، بنادر و کاهش ظرفیت آبیگری آنها نیز زیان‌های فراوانی را سبب می‌شود. اگر استفاده از خاک براساس شناسایی استعداد و قدرت تولیدی آن و مبتنی بر رعایت اصول صحیح و علمی باشد، خاک از بین نمی‌رود (Refahi, 2006). نوع و شدت فرسایش خاک در هر منطقه عمدتاً تابع شرایط اقلیمی، پستی و بلندی و پوشش زمین (کاربری اراضی) است که در این میان کاربری اراضی مؤثرتر از دیگر فاکتورهاست. کاربری اراضی در واقع هم استفاده از اراضی است و مدیریت آن؛ و به دلیل فعالیت‌های استفاده از اراضی فاکتورهای دیگر را نیز تحت تأثیر قرار داده و از همه فاکتورها به صورت انفرادی مهم‌تر و مؤثرتر است (Saravii et al., 2009; Terrence et al., 2001). در واقع هدف نهایی در حوضه آبخیز اعمال مدیریت جامع و هماهنگ و یکپارچه بر کلیه منابع آبخیز است به نحوی که ضمن بهره‌برداری متناسب و منطقی و بهینه از منابع طبیعی و کشاورزی و انسانی، میزان هدررفت آب و فرسایش خاک به کمترین میزان ممکن برسد. با توجه به اینکه تغییر میزان رواناب از جمله تأثیرات مسلم تغییر کاربری اراضی است و البته میزان آن در فرسایش زیاد است، از پارامترهای پراهمیت در بهینه‌سازی کاربری اراضی به شمار می‌آید.

وضعیت کاربری اراضی در آینده می‌تواند بسته به شرایط، دربردارنده شکل‌های مختلفی باشد؛ اما اینکه کدام یک نتیجه مطلوب‌تری خواهد داشت، نیازمند فاکتورهایی است تا بتوان براساس آنها الگوی کاربری اراضی مطلوب‌تر را برگزید. تغییرات مداوم کاربری اراضی می‌توانند دربردارنده تأثیراتی چون از بین رفتن خاک، کاهش تنوع زیستی، آلودگی آب و هوا، تغییر در میزان رواناب، پیامدهای اقتصادی - اجتماعی و جز اینها باشد. از آنجا که بررسی چنین موضوعاتی به صورت مستقیم و در روی زمین بسیار مشکل است، برای شناخت تأثیر کاربری‌های مختلف باید از مدل‌های کامپیوتری استفاده کرد (Deb, 2007). به‌کارگیری درست و معقول نظریه‌ها و مدل‌ها مستلزم آن است که کاربران از فرضیات و نظریه‌ها و مدل‌ها آگاه باشند، قابلیت‌ها و مزایا و معایب (محدودیت‌ها) را بشناسند و آنها را برای موضوع طراحی‌شده به کار گیرند (Briassoulis, 2000). چالش اساسی در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه این است که معمولاً دسته‌ای تصمیم از مجموعه تصمیمات ممکن لزوماً همه اهداف را هم‌زمان و به بیشترین میزان ممکن بهینه نمی‌سازد. در چنین حالتی، بهینگی دارای تعریف ویژه‌ای است و به جای وجود جواب واحد، می‌توان به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه دست یافت. هدف در برنامه‌ریزی کاربری اراضی چندهدفه می‌بایست بر افزایش آگاهی و فهم تضاد و تبادل بین اهداف برای تصمیم‌گیری منطقی و مستدل تمرکز یابد. روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان به دو دسته کلاسیک و غیرکلاسیک تقسیم‌بندی کرد. روش‌های کلاسیک برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه از روش مبتنی بر ارجحیت پیروی می‌کند که در آن یک بردار ارجحیت نسبی به منظور هم‌مقیاس کردن اهداف چندگانه به کار می‌رود و نتیجه آن جواب بهینه واحد است. بنابراین عمل یافتن جواب‌های بده - بستان چندگانه در بهینه‌یابی چندهدفه به یافتن جواب واحد در بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل می‌گردد (Rezaei and Davoodi, 2009). روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه

در بردارنده هزینه‌های اقتصادی و همچنین منافع و تبعات زیست‌محیطی است که می‌تواند سودمند یا زیان‌آور باشند و البته برقراری تعادل در این میان ضروری است. بدین ترتیب، با ارزیابی و مقایسه گزینه‌های عملی و امکان‌پذیر، باید به دنبال بهترین الگویی بود که توأمان هزینه‌ها و منافع زیست‌محیطی و اقتصادی مطلوب و مناسب را در بر داشته باشد. با به‌کارگیری الگوریتم چندهدفه تکاملی، امکان ایجاد الترناتیوهای مختلف و ارزیابی آنها وجود خواهد داشت. این تحقیق از دیدگاه تکنیکی به دنبال تدوین مدل بهبودسازی چندهدفه برای تخصیص کاربری اراضی مناسب به واحدهای مختلف اراضی با استفاده از الگوریتم NSGA-II است که هدف نهایی در آن بهره‌برداری متناسب و بهینه از منابع، به گونه‌ای است که میزان بازدهی اقتصادی افزایش یابد و میزان فرسایش خاک رو به کاهش نهد.

## ۲- مواد و روش‌ها

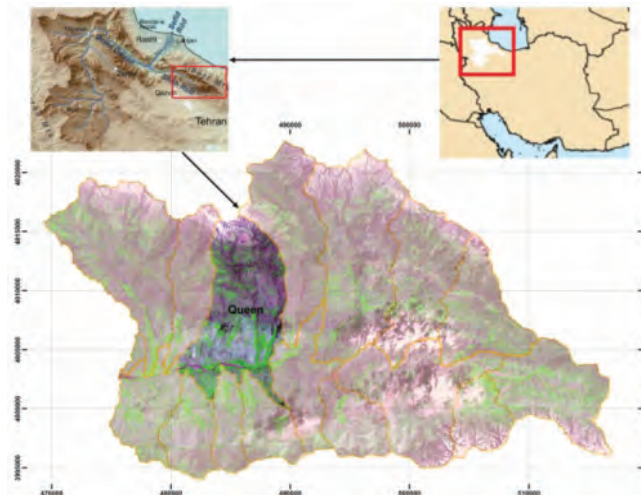
در این بخش ابتدا به منطقه مورد مطالعه و سپس به روش به کار برده شده برای الگوریتم ژنتیک در دستیابی به اهداف تحقیق پرداخته شده است.

### ۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه طالقان در ۱۲۰ کیلومتری شمال غربی تهران در جهت شرقی- غربی، در میان دره بزرگی در کوه‌های البرز قرار دارد. طالقان از سه بخش «پایین طالقان، میان طالقان، و بالا طالقان» با حدود ۸۰ روستای کوهستانی تشکیل شده است. مساحت حوضه طالقان تا خروجی ایستگاه گلینک حدود ۸۲۰ کیلومتر مربع است.

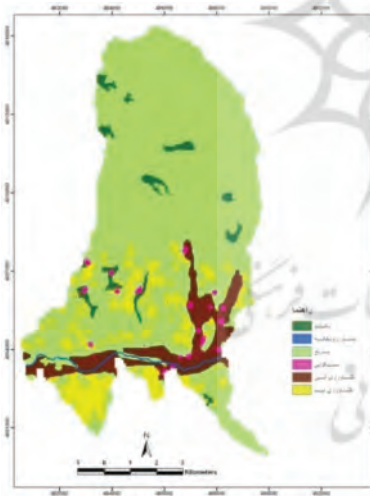
کلاسیک در حل مسائل پیچیده، با نقص‌های عمده‌ای مانند محاسبات زیاد همراهاند (Bazargan-Lari et al., 2010). این روش‌ها در برخورد با مسائل دارای فضای جست‌وجوی گسسته، فاقد کارایی لازم‌اند و این امر روش‌های مذکور را در حل مسائل بهبودسازی چندهدفه ناکارآمد می‌سازد. طی چند سال اخیر، تعدادی از الگوریتم‌های جست‌وجو و بهینه‌یابی غیرکلاسیک مطرح شده‌اند. در این میان الگوریتم‌های تکاملی<sup>۱</sup> (EA)، اصول تکامل طبیعی را برای جست‌وجوی جواب بهینه تقلید می‌کنند. الگوریتم‌های تکاملی، دلیل آنکه رویکرد جمعیتی دارند، می‌توانند در هر بار اجرای شبیه‌سازی چندین جواب بهینه را بیابند. بنابراین الگوریتم‌های تکاملی گزینه‌های مناسبی برای حل مسائل بهبودسازی چندهدفه‌اند (Rezaei and Davoodi, 2009). الگوریتم‌های تکاملی به راحتی می‌توانند مسائلی را که از پیوستگی خاصی تبعیت نمی‌کنند یا فضای تصمیم موجه یکپارچه‌ای ندارند و یا توابع هدف آنها دارای پارامترهای تصادفی‌اند، حل کنند (Rezapour Tabari et al., 2009).

الگوریتم‌های تکاملی ابزارهایی کارآمد در بهبودسازی‌اند و بهبودسازی تخصیص کاربری اراضی از راهکارهای مناسب برای حفاظت خاک و افزایش بازده اقتصادی است. مدل بهبودسازی در برنامه‌ریزی کاربری اراضی باید انعطاف‌پذیر و توانا و چندان که لازم است کارآمد باشند؛ و به‌ویژه بسیار مهم است که ابزارهای به‌کاررفته توانایی حل مسئله را به صورت مکانی داشته باشد، بدون اینکه نیازی به تبدیل راه‌حل بهینه به الگوی مکانی باشد. البته توانایی حل مسئله با چند هدف متضاد نیز می‌بایست وجود داشته باشد. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای جست‌وجو و بهبودسازی، با شرایط و موارد ذکرشده مطابقت دارد و بستری مناسب را برای تصمیم‌گیری منطقی و مستدل فراهم می‌کند. در این تحقیق، گزینه‌های مختلف کاربری اراضی با چند هدف مقایسه شده است. موارد مذکور شامل تأثیر بر میزان فرسایش خاک، رواناب تناسب اراضی، میزان فشرده‌گی، سازگاری و بازدهی اقتصادی است. هر گزینه



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران با دقت ۱:۱۰۰۰۰۰، و همچنین داده‌های توپوگرافی مانند خطوط میزان از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری استخراج گردید.



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی منطقه

این حوضه از زیرحوضه‌های آبخیز سفیدرود به شمار می‌آید که بین طول شرقی  $50^{\circ} 36'$  تا  $51^{\circ} 10'$  و عرض شمالی  $36^{\circ} 5'$  تا  $36^{\circ} 21'$  قرار دارد و از شمال به حوضه الموت و سرداب، از جنوب به کردان و زیاران، از شرق به حوضه کرج و چالوس، و از غرب به حوضه زیاران و الموت محدود می‌شود. محدوده مطالعاتی این تحقیق، زیرحوضه کویین از حوضه طالقان است (شکل ۱).

جهت جریان در شاخه اصلی رودخانه از شرق به غرب است و شاخه‌های فرعی آن در دامنه‌های شمالی و جنوبی به سمت شاخه اصلی رودخانه جاری‌اند. ارتفاع متوسط محدوده ۲۴۶۶ متر، شیب متوسط  $33/08$  درصد، متوسط بارش سالانه ۵۰۰ میلی‌متر، توسط درجه حرارت سالانه  $4/48$  درجه سانتی‌گراد، و اقلیم منطقه براساس روش آمبرژه همانا ارتفاعات سرد است (Arzani et al., 2009).

## ۲-۳- اطلاعات فرسایش و سود اقتصادی کاربری‌های مختلف

سهم و میزان فرسایش و سوددهی اقتصادی حاصل از کاربری‌های مختلف (جز مسکونی) در حوضه آبخیز طالقان از طرح پژوهشی انجام‌شده به وسیله گروه

## ۲-۲- برداشت و جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات

نقشه کاربری اراضی منطقه از تصویر ETM+ سال ۲۰۰۲ و به روش طبقه‌بندی حداکثر شباهت تهیه شد (شکل ۲). لایه مربوط به خاک از مطالعات انجام‌شده در سال ۱۳۷۲ به‌وسیله گروه مهندسی آبیاری و آبادانی

## ۲-۵- میزان رواناب

طبق مطالعات محسنی و همکاران در سال ۱۳۸۸ نیاز آبی حوضه طالقان به میزان ۸۲۱۴۲۹ مترمکعب در سال محاسبه گردیده است، و با توجه به منابع آب موجود با مجموع تخلیه سالانه ۸ میلیون مترمکعب، منطقه دچار کمبود آب نیست. بدین ترتیب، با توجه به اینکه میزان رواناب سالانه تقریباً ۱۰ برابر نیاز آبی است، در این تحقیق حداقل سازی میزان رواناب در نظر گرفته شد. در این مطالعه، مقدار رواناب با استفاده از روش شماره منحنی<sup>۱</sup> محاسبه گردید.

## ۲-۶- میزان تناسب

برای تعیین تناسب با پتانسیل منطقه مورد مطالعه برای توسعه کاربری‌های مورد نظر، از تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد. بدین منظور با تعیین معیارهای مؤثر در ارزیابی تناسب کاربری‌ها، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز در محیط نرم‌افزار ArcGIS جمع‌آوری و آماده‌سازی گردید. پس از تعیین معیارهای فرعی، نمودار تحلیل سلسله‌مراتب ایجاد شد. برای ارزیابی لازم بود تا اهمیت نسبی (وزن) هر کدام از عوامل مشخص شود و براساس آن ضرایب ویژه‌ای به عنوان وزن در تجزیه و تحلیل اطلاعات اعمال شود. در این مطالعه از روش مقایسه زوجی برای وزن‌دهی عوامل استفاده شد. سپس با استفاده از روش همپوشانی وزنی، معیارها به صورتی که در پی می‌آیند با هم ترکیب شدند و لایه‌های تناسب کاربری‌های مختلف تولید گردیدند.

جدول ۱. ضرایب سازگاری کاربری‌ها

کاربری اراضی	کشت آبی	کشت دیم	مرتع	مسکونی	باغ
کشت آبی	۱	۰/۷	۰/۴	۰/۲	۰/۸
کشت دیم	۰/۷	۱	۰/۵	۰/۴	۰/۶
مرتع	۰/۴	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۷
مسکونی	۰/۲	۰/۴	۰/۵	۱	۰/۸
باغ	۰/۸	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱

احیای مناطق خشک و کوهستانی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهیه و جمع‌آوری شده است (Saravi et al., 2009). به دلیل فقدان اطلاعات مربوط به میزان فرسایش و سوددهی اقتصادی کاربری مسکونی، میانگین مقدار فرسایش کاربری‌های مرتع و دیم (۷/۸۵ تن در هکتار) به عنوان میزان فرسایش کاربری مسکونی، و میزان بازدهی کاربری مسکونی نیز به صورت کارشناسی تعیین گردید (جدول ۲). میزان فرسایش و میزان سوددهی به عنوان توابع هدف در مدل وارد شدند.

## ۲-۴- میزان فشردگی - سازگاری کاربری‌ها

در زمینه‌های مختلف برنامه‌ریزی کاربری اراضی، میزان فشردگی و پیوستگی قطعات به دلیل تأثیر بر کاهش مصرف انرژی و نیز ارتقای دسترسی و عدالت اجتماعی مورد نظر است (Kai C, 2010). همچنین به منظور مدل‌سازی تأثیر کاربری خاصی برای کاربری‌های دیگر، سازگاری بین کاربری‌ها در نظر گرفته شد. عملگر طراحی و پیاده‌سازی شده در این تحقیق به صورت توأم فشردگی و نحوه مجاورت، کاربری‌های مختلف - و سازگاری آنها - را مدنظر قرار می‌دهد؛ بدین صورت که بین دو الگوی کاربری اراضی با فشردگی برابر، الگویی که سازگاری بیشتری بین کاربری‌های آن وجود دارد، امتیاز بیشتری برای انتخاب دارد. جدول ۱، میزان اعمال سازگاری را نشان می‌دهد.

### 1. Curve Number

subject to  $g_j(x) \geq 0$ ,

$$j = 1, 2, \dots, J;$$

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

یک جواب  $x$  برداری از  $n$  متغیر تصمیم است:

رابطه (۳)

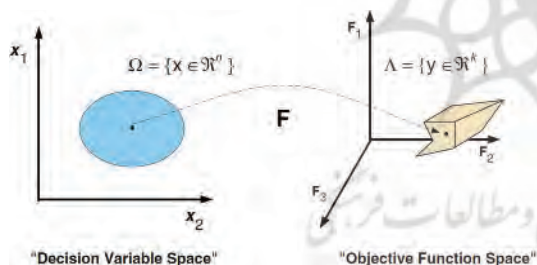
$$x = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^T$$

هر متغیر تصمیم محدود به گرفتن مقداری بین حد پایینی  $x_i^{(L)}$  و حد بالایی  $x_i^{(U)}$  است. این حدود، فضای متغیر تصمیم را شکل می‌دهند. همچنین برداری از  $m$  تابع هدف است:

رابطه (۴)

$$f(x) = [f_1(x) \quad f_2(x) \quad \dots \quad f_m(x)]^T$$

$g_j(x)$  و  $h_k(x)$  توابع محدودیت‌اند، و  $J$  تعداد محدودیت نامعادله و  $K$  تعداد محدودیت معادله است. نداشت بین فضای متغیر تصمیم<sup>۲</sup> و فضای هدف<sup>۳</sup> در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. نمایش فضای متغیر تصمیم و فضای هدف (اقتباس از Coello, ۲۰۰۷)

## ۲-۷-۱- NSGA-II

با ارتقای الگوریتم NSGA، نسخه‌گرایی دسته‌بندی یا مرتب‌سازی نامغلوب در الگوریتم ژنتیک با عنوان Deb et al., 1995, پیشنهاد داده شد (NSGA-II)

1. Pareto optimal solutions
2. Decision space
3. Objective Space

رابطه (۱)

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i S_{ij}}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$\bar{S}$ : امتیاز موقعیت در نقشه خروجی،  $W_i$ : وزن آامین نقشه ورودی (معیار)،  $S_{ij}$ : امتیاز آامین معیار فرعی از آامین نقشه. بنابراین در لایه‌های تناسب مناطقی که پیکسل‌های تشکیل‌دهنده آن ارزش بیشتری دارند، برای کاربری مورد نظر مناسب‌ترند.

## ۲-۷- بهینه‌سازی چندهدفه

یافتن یک یا چند راه حل ممکن و مقایسه آنها برای رسیدن به تصمیمات بهینه یا خوب در مسائل پیچیده، بهینه‌سازی نامیده می‌شود. بخش عمده‌ای از تحقیقات و کاربردهای عملی بهینه‌سازی، شامل مسائل تک‌هدفه است، اما بیشتر مسائل پیرامون ما در جهان واقعی، درگیر چند هدف ناسازگار یا متضاد هستند (Villalta, 2009). هنگامی که مسئله بهینه‌سازی بیش از یک تابع هدف را دربرگیرد، یافتن یک یا چند جواب بهینه را می‌توان بهینه‌سازی چندهدفه نامید. در چنین شرایطی، پیدا کردن یک جواب که همه اهداف را بهینه کند تقریباً ناممکن است و سعی می‌شود مجموعه‌ای از جواب‌ها با بهینه‌سازی نسبی در همه اهداف یافت شود. در واقع، قصد یافتن جواب‌های بهینه پارتو<sup>۱</sup> است (Deb, 2001). در مجموعه بهینه پارتو چون هر دو جواب از مجموعه نسبت به یکدیگر نامغلوب‌اند، با حرکت از یک نقطه (جواب) به نقطه دیگر، دست‌کم یک تابع هدف بهتر می‌شود و یک تابع هدف دیگر بدتر می‌شود (Yee et al., 2003). فرم کلی مسائل چندهدفه بدین صورت است (Rezaei and Davoodi, 2009):

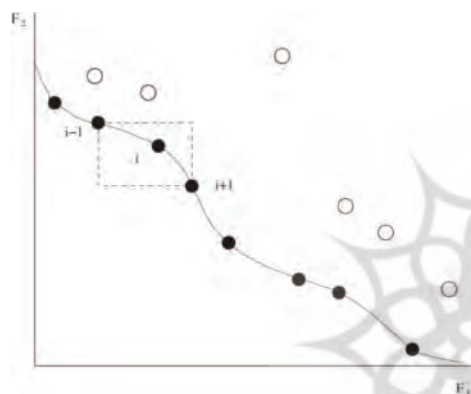
رابطه (۲)

$$\text{Minimize / Maximize } f_m(x),$$

$$m = 1, 2, \dots, M;$$

### فاصله ازدحام

برای به دست آوردن تخمینی از چگالی جواب‌های موجود در کنار یک جواب خاص مانند جواب  $i$  در جمعیت (شکل ۴)، میانگین فاصله‌ای از دو جواب واقع در طرفین جواب  $i$  برای هر کدام از  $M$  تابع هدف محاسبه می‌شود. مقدار عددی  $d_i$  که از محاسبه تقریبی فضای مکعبی اطراف جواب  $i$  با به کار بردن نزدیک‌ترین همسایه‌های آن به دست می‌آید، فاصله ازدحام نامیده می‌شود.



شکل ۴. نمایش گرافیکی ازدحام

رابطه (۵)

$$d_i^1 = \frac{f_1(x_{i+1}) - f_1(x_{i-1})}{f_1^{\max} - f_1^{\min}}$$

رابطه (۶)

$$d_i^r = \frac{f_r(x_{i+1}) - f_r(x_{i-1})}{f_r^{\max} - f_r^{\min}}$$

رابطه (۷)

$$d_i = d_i^1 + d_i^r$$

$x_i$ : جواب  $i$ ام،  $d_i^1$ : فاصله ازدحام جواب  $i$ ام در تابع هدف اول،  $d_i^r$ : فاصله ازدحام جواب  $i$ ام در تابع هدف دوم و  $d_i$ : فاصله ازدحام جواب  $i$ ام.  
شکل ۵ نحوه عملکرد NSGA-II را نشان می‌دهد (Coello, 2007).

2005, 2001, 2003). در این قسمت مفاهیم به کاررفته در NSGA-II توضیح داده می‌شوند.

### مفهوم غلبه

جواب  $x^{(1)}$  بر جواب  $x^{(2)}$  غالب است، اگر این هر دو شرط برقرار باشد:  
الف) جواب  $x^{(1)}$  در هیچ یک از اهداف بدتر از  $x^{(2)}$  نباشد؛ و  
ب) جواب  $x^{(1)}$  دست‌کم در یک هدف بهتر از جواب  $x^{(2)}$  باشد.

از آنجا که مفهوم غلبه، زمینه مقایسه جواب‌ها با اهداف چندگانه را مهیا می‌سازد، معمولاً در روش‌های بهینه‌یابی چندهدفه برای جست‌وجوی جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود.

### مجموعه نامغلوب

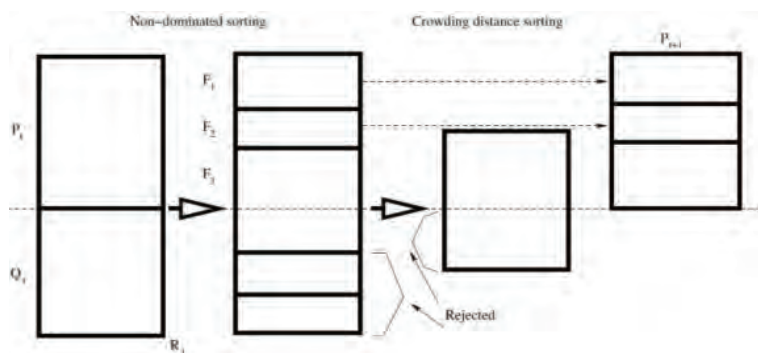
از بین مجموعه جواب‌های  $P$ ، مجموعه جواب‌های نامغلوب  $P^*$ ، آنهایی هستند که مغلوب هیچ یک از اعضای مجموعه  $P$  نیستند.

### عملگر انتخاب مسابقه‌ای ازدحام

با فرض اینکه هر جواب یا راه حل  $i$  دارای یک رتبه نامغلوب بودن ( $r_i$ ) و یک فاصله ازدحام محلی ( $d_i$ ) است، عملگر مسابقه‌ای ازدحام ( $<$ ) براساس قاعده‌ای که ذکر می‌شود، دو جواب را مقایسه می‌کند و یکی را برمی‌گزیند.

جواب  $i$  در رقابت با جواب  $j$  صرفاً در صورتی انتخاب می‌شود که این شرایط برقرار باشد:

- جواب  $i$  رتبه بهتری داشته باشد، که آن‌گاه  $r_i < r_j$ ؛ و
- جواب‌های  $i$  و  $j$  در یک صف قرار داشته باشند اما جواب  $i$  فاصله ازدحام بهتری در مقایسه با جواب  $j$  دارد؛ پس  $r_i = r_j$  و  $d_i > d_j$ .



شکل ۵. نحوه عملکرد NSGA-II

تحقیق منطقه مورد مطالعه، مجموعه‌ای از تعدادی واحد در نظر گرفته شده که با شبکه‌ای دوبعدی با محورهای  $(i, j)$  از یک ماتریس دوبعدی نشان داده می‌شود (شکل ۶).

		$j$			
		$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	$e_{14}$
		$e_{21}$	$e_{22}$	$e_{23}$	$e_{24}$
		$e_{31}$	$e_{32}$	$e_{33}$	$e_{34}$
		$e_{41}$	$e_{42}$	$e_{43}$	$e_{44}$
$i$					

شکل ۶. نمایش شماتیک مدل دوبعدی منطقه

### ۳-۱- مؤلفه‌های مدل ریاضی

می‌توان مؤلفه‌های مدل ریاضی مسئله را بدین صورت بیان کرد:

### متغیرهای تصمیم<sup>۳</sup>

متغیرهای تصمیم همان کلاس‌های کاربری اراضی‌اند.

در این روش ابتدا جمعیت فرزندان یا  $Q_t$  با استفاده از جمعیت والدین یا  $P_t$  ساخته می‌شود؛ سپس دو جمعیت با هم ترکیب می‌گردند جمعیت  $R_t$  با اندازه  $2N$  ایجاد می‌شود. سپس از مرتب‌سازی نامغلوب برای دسته‌بندی تمام جمعیت  $R_t$  استفاده می‌شود. پس از ایجاد صف‌های متفاوت نامغلوب، جمعیت بعدی به ترتیب اولویت از این صف‌ها پر می‌شود. پر کردن  $P_{t+1}$  با بهترین صف نامغلوب آغاز می‌گردد و سپس به ترتیب با دومین صف نامغلوب و همین‌طور سومین و الی آخر تا زمانی که  $P_{t+1}$  پر شود. در مورد صف آخر جواب‌هایی که دارای فاصله ازدحام<sup>۱</sup> (CD) بیشتری هستند برای پر کردن  $P_{t+1}$  در اولویت قرار دارند. در نهایت جمعیت فرزندان  $Q_{t+1}$  از  $P_{t+1}$  با استفاده از یک الگوریتم انتخاب مسابقه‌ای ازدحام<sup>۲</sup> و عملگرهای تقاطع و جهش ایجاد می‌شود.

### ۳-۲ پیاده‌سازی مدل برای مدیریت کاربری اراضی

#### در چارچوب مسئله بهینه‌سازی چندهدفه

تخصیص کاربری اراضی فرایندی رقابتی برای رسیدن به اهداف تعیین‌شده مدیران و تصمیم‌گیرندگان است که در آن رده‌های مختلف «قابل رقابت» کاربری اراضی به واحدهای زمین اختصاص داده می‌شوند. این فرایند پیچیده است، چون تصمیمات علاوه بر اینکه اهداف مدیران را دنبال می‌کنند، در پی رعایت محدودیت‌های موجود نیز هستند (Stewart et al., 2004). در این

1. Crowding Distance  
2. Crowded Tournament  
3. Decision Variable



رابطه (۸)  $S_{lu,i,j}$  عامل مربوط به نگهداشت آب در سطح زمین

(برحسب میلیمتر) و مقدار آن برابر است با:

رابطه (۱۳)

$$S_{lu,i,j} = 25/4 * \left( \frac{1000}{CN_{lu,i,j}} - 10 \right)$$

در این معادله  $CN_{lu,i,j}$  شماره منحنی مربوط به مقدار نفوذ آب در واحد (i,j) با کاربری lu است. پس از تعیین مقدار  $CN_{lu,i,j}$ ، مقدار  $S_{lu,i,j}$  مشخص می‌گردد و با در نظر گرفتن بارندگی، ارتفاع رواناب محاسبه می‌شود.

لازم به توضیح است که چون بین میزان فرسایش و رواناب رابطه‌ای نمایی وجود دارد، در اجرای مدل توابع هدف دوم و سوم به صورت وزنی با وزن برابر با یکدیگر ترکیب شدند.

تابع هدف ۴: حداکثرسازی توأم با فشردگی و سازگاری:

رابطه (۱۴)

$$f_4 = \text{Max}\{C_{cc}^1 + C_c^2\}$$

$C_{cc}^1$ : سازگاری کلاس c و c'،  $C_c^2$  میزان فشردگی کلاس c

#### محدودیت‌ها

محدودیت‌های در نظر گرفته شده مسئله مشتمل بر اینهاست:

محدودیت شیب مجاز هر کاربری در هر واحد  
رابطه (۱۵)

$$\text{Slope}_{lu}^{\min} \leq \text{Slope}_{i,j} \leq \text{Slope}_{lu}^{\max}$$

$\text{Slope}_{i,j}$ : شیب واحد (i,j)،  $\text{Slope}_{lu}^{\max}$  و

$\text{Slope}_{lu}^{\min}$ : محدوده شیب مجاز برای کاربری lu

چون حداقل شیب مجاز برای هر کاربری lu برابر صفر است:

رابطه (۱۶)

$$\text{Slope}_{i,j} \leq \text{Slope}_{lu}^{\max}$$

$$lu \in LU, \quad LU = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

که اعضای LU از ۱ تا ۵ به ترتیب عبارت‌اند از: کلاس‌های کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، مرتع، مسکونی و باغ.

#### توابع هدف

تابع هدف ۱: حداکثرسازی سود اقتصادی

رابطه (۹)

$$f_1 = \text{MAX} \sum_{lu=1}^{LU} \sum_{i=1}^{R_u} \sum_{j=1}^{C_u} O_{lu,i,j}$$

$O_{lu}$ : میزان سوددهی کاربری lu، LU: تعداد کاربری اراضی،  $R_u$ : تعداد سطرها،  $C_u$ : تعداد ستون‌ها. به هر کاربری (lu) یک ضریب بازدهی بر اساس جدول شماره ۲ اختصاص داده شد.

تابع هدف ۲: حداقل‌سازی میزان فرسایش

رابطه (۱۰)

$$f_2 = \text{Min} \sum_{lu=1}^{LU} \sum_{i=1}^{R_u} \sum_{j=1}^{C_u} d_{lu,i,j}$$

در تابع مذکور،  $d_{lu,i,j}$  مقدار فرسایش واحد (i,j) با کاربری lu است. مقدار  $d_{lu,i,j}$  براساس جدول شماره ۲ به هر کاربری اختصاص داده شد.

تابع هدف ۳: حداقل‌سازی میزان رواناب تولیدی

رابطه (۱۱)

$$f_3 = \text{MIN} \sum_{lu=1}^{LU} \sum_{i=1}^{R_u} \sum_{j=1}^{C_u} r_{lu,i,j}$$

در تابع مذکور  $r_{lu,i,j}$  مقدار رواناب از واحد (i,j) با کاربری lu است. مقدار رواناب براساس روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) محاسبه می‌گردد:

رابطه (۱۲)

$$r_{lu,i,j} = \frac{(P_{i,j} - 0.25S_{lu,i,j})^2}{P_{i,j} + 0.75S_{lu,i,j}}$$

$P_{i,j}$  ارتفاع بارندگی واحد (i,j) برحسب میلیمتر، و

### محدودیت مساحت مربوط به هر کاربری

در برنامه‌ریزی کاربری اراضی مساحت اختصاص یافته به کلاس‌های مختلف اراضی اهمیت فراوان دارد. از طرفی در کروموزوم‌های حاصل از روش‌های تکاملی، کلاس‌های کاربری اراضی می‌توانند مساحت‌های متنوعی را به خود اختصاص دهند. از این رو تعیین نسبت مساحت کلاس‌های مختلف کاربری اراضی بسیار مهم است. در این مقاله، بازه‌ای از مساحت کلاس‌ها در وضعیت موجود کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه به عنوان محدودیت در نظر گرفته شد. برای اعمال محدودیت مساحت از نسبت مساحت هر کاربری به مساحت کل استفاده شد.

رابطه (۱۷)

$$\alpha_{lu} = \frac{\sum_{i,j} A_{i,j} X_{lu,i,j}}{\sum_{i,j} A_{i,j}}$$

$\alpha_{lu}$ : نسبت مساحت اختصاص یافته به کاربری نوع

$$(lu \in \{1, 2, 3, 4, 5\}) \quad lu$$

رابطه (۱۸)

$$\sum_{lu} X_{lu,i,j} = 1 \quad \forall i, j$$

رابطه (۱۹)

$$\alpha_{lu}^{\min} \leq \alpha_{lu} \leq \alpha_{lu}^{\max}$$

$X_{lu,i,j}$  متغیر باینری است که اگر کاربری اختصاص

داده شده به واحد (i,j) برابر lu باشد مقداری برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد داشت.

$A_{i,j}$ : مساحت واحد (i,j)

( $\alpha_{lu}^{\max}, \alpha_{lu}^{\min}$ ): حداقل و حداکثر نسبت

مساحت‌های مجاز برای کاربری lu

در این تحقیق برای حفظ وضع موجود و همچنین بررسی عملکرد مدل در شرایط مشابه وضع موجود، محدودیت مساحت برای هر کاربری  $\pm 10\%$  درصد مساحت فعلی و در مورد کاربری مسکونی  $+10\%$  درصد مساحت فعلی در نظر گرفته شد.

### ۳-۲- ساختار الگوریتم ژنتیک

در این بخش کروموزوم و کارکرد عملگرها در الگوریتم‌های مورد استفاده توضیح داده می‌شود.

#### کروموزوم‌ها

در این تحقیق، کروموزوم تعریف شده به وسیله داتا و همکاران ۲۰۰۶ به کار رفت. نمایش ریاضی کروموزوم تعریف شده بدین صورت است:

رابطه (۲۰)

$$Ch = [e_{ij}^u] R_{ii} . C_{ii}$$

$e_{ij}^u$  کلاس کاربری e که به واحد (i,j) اختصاص

داده شده،  $R_{ii}$  تعداد کل سطرها و  $C_{ii}$  تعداد کل تعداد

کل ستون‌هاست. طبق تعریف مذکور که در شکل ۸

نمایش داده شده است، گستره منطقه مورد مطالعه به

صورت ماتریس در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که

مکان هر واحد با اندیس (i,j) و مقدار هر واحد نیز

بیانگر کاربری اراضی آن واحد است.

#### عملگر تقاطع<sup>۱</sup>

در این تحقیق دو نوع مختلف عملگر تقاطع برای ایجاد

پیوند میان والدین یک نسل طراحی و پیاده‌سازی شد.

#### تقاطع یکنواخت<sup>۲</sup> (UC)

یک ماتریس تصادفی از ارقام صفر و یک به ابعاد منطقه

ایجاد شد. در سلول‌های نظیر، اگر رقم تصادفی

عدد یک باشد، تغییری به وجود نمی‌آید. اگر رقم

ماتریس تصادفی صفر باشد، آن‌گاه کلاس اراضی

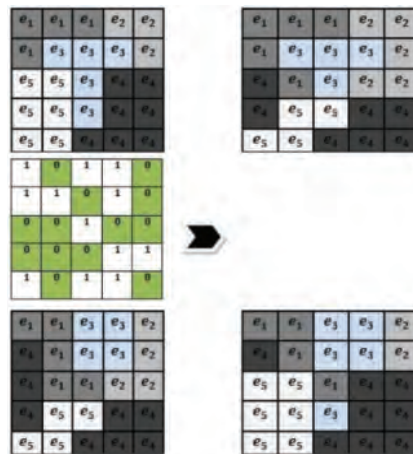
خانه‌های دو کروموزوم والد با هم عوض می‌شوند. نحوه

عملکرد UC در شکل ۷ درج شده است.

1. Crossover Operators
2. Uniform Crossover

### عملگر جهش<sup>۲</sup>

عملگر جهش کلاس کاربری اراضی در مکانی از منطقه را به امید یافتن الگویی بهتر از کاربری اراضی تغییر می‌دهد. این عملگر برحسب پارامتر احتمال تعیین شده، بر روی درصدی از واحدهای زمین عمل می‌کند و کلاس اراضی آن واحد را به کلاسی دیگر تغییر می‌دهد.



شکل ۷. نحوه عملکرد عملگر UC

### تابع جریمه<sup>۳</sup>

استفاده از تابع جریمه، شیوه‌ای متداول در مسائل دارای قید است که در آن کروموزوم‌های غیرمجاز حذف نمی‌گردند، و این فرصت داده می‌شود که اطلاعات ژنتیکی آنها مورد استفاده قرار گیرد. با این شیوه برازش جواب‌های خارج از قیود به شدت کم می‌شود. در نتیجه فرایند انتخاب به سمت کروموزوم‌هایی که در قیدها صادق‌اند، گرایش می‌یابد. مقدار جریمه و ضرایب تابع جریمه وابسته به مسئله مورد بررسی هستند و در هر مسئله باید به صورت جداگانه تعیین شوند (Bavi et al. 2008). در این تحقیق برای برآورده ساختن محدودیت مساحت از تابع جریمه استفاده شد. به این منظور ابتدا میزان تخطی از قید نرمالایز شد:

$$v_1 = \max(1 - \alpha/\alpha_{\min}, 0) \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$v_2 = \max(\alpha/\alpha_{\max} - 1, 0)$$

بنابراین برای هر جواب خواهیم داشت:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

مقدار جریمه براساس  $v$  و پارامتر جریمه ( $\beta$ ) محاسبه می‌گردد:

$$\text{Penalty} = 1 + \beta * v \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

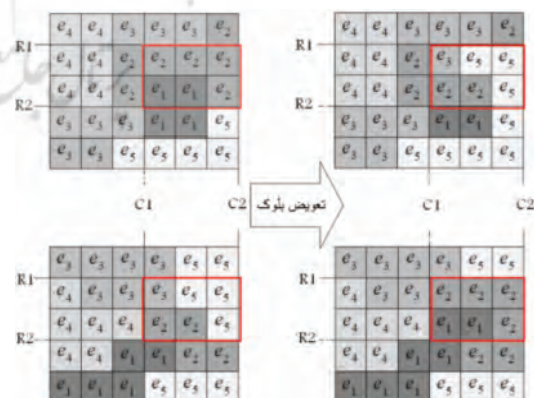
در نهایت در توابع کمینه‌یابی مقدار تابع هدف در مقدار جریمه ضرب گردید:

$$F_m(x^{(i)}) = f_m(x^{(i)}) * \text{Penalty} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

و در توابع بیشینه‌یابی مقدار تابع هدف بر مقدار

### تقاطع دوبعدی

داتا و همکاران (۲۰۰۶) عملگری دوبعدی ارائه کردند. که نتایج مطلوبی هم در برداشت. اما اشکال آن در این بود که بلوک تعیین شده به اجبار مرز کروموزوم (منطقه مورد مطالعه) را هم در بر می‌گرفت. در این مطالعه، عملگری به نام تقاطع دوبعدی<sup>۱</sup> (TDC) به گونه‌ای ایجاد شد که یک بلوک به تصادف از والدین انتخاب و بین آنها تعویض می‌شود؛ با این تفاوت که بلوک انتخابی می‌تواند از هر قسمتی از منطقه مورد مطالعه باشد. شکل ۸ نحوه عملکرد عملگر TDC را نشان می‌دهد.



شکل ۸. نحوه عملکرد عملگر TDC

1. Two-Dimensional Crossover
2. Mutation Operators
3. Penalty Function

مختلف تقاطع و عملگر جهش بدون هیچ گونه راهنمایی در تولید جمعیت اولیه مورد استفاده قرار گرفت. بعد از ۷۰۰۰ نسل، هیچ جواب موثری تولید نگردید. لازم به توضیح است که جواب موثر، جوابی است که محدودیت مساحت همه کاربری‌ها در آن رعایت شده باشد. همان طور که پیش از این نیز اشاره شده بود، محدودیت مساحت برای هر کاربری  $\pm 10\%$  درصد مساحت فعلی و در مورد کاربری مسکونی  $+10\%$  درصد مساحت فعلی در نظر گرفته شد. در شکل ۹ نقشه‌های به دست آمده با استفاده از عملگر TDC و UC نشان داده شده است. با توجه به شکل، در هر دو حالت، توزیع کاربری‌ها از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند. دلیل آن نیز می‌تواند این باشد که به جز کاربری مرتع که حدود ۷۵ درصد مساحت وضعیت فعلی منطقه را تشکیل می‌دهد، بقیه کاربری‌ها درصد پایینی دارند و به همین خاطر هنگامی که جمعیت اولیه به صورت کاملاً تصادفی تولید می‌شود، این وضعیت رعایت نمی‌گردد و کاربری‌های دیگر در هر جایی که محدودیت‌ها نقض نشود، از طریق مدل، تخصیص می‌یابد. همچنین شکل نشان می‌دهد که کاربری مسکونی در مقایسه با کاربری‌های دیگر، مساحتی بیش از وضعیت فعلی را به خود اختصاص داده است.

جریمه تقسیم گردید:

$$F_m(x^{(i)}) = f_m(x^{(i)}) / \text{Penalty} \quad (24)$$

برای جواب موثر، مقدار  $V$  متناسب با آن صفر و  $F_m$  مساوی مقدار واقعی تابع هدف است. برای جواب ناموجه نیز بسته به نوع تابع هدف، مقدار  $F_m$  بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از  $f_m$  خواهد بود.

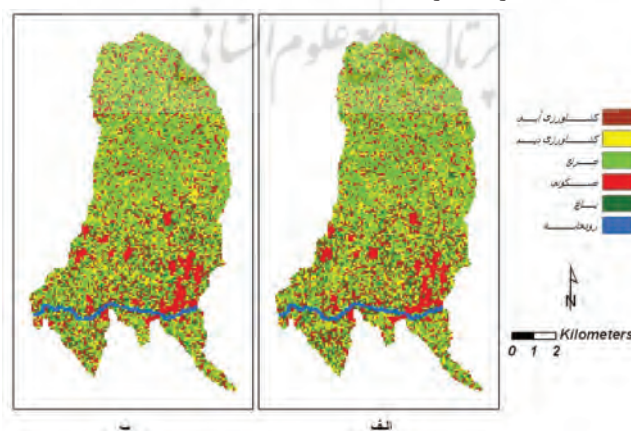
مدل در محیط نرم‌افزار Matlab طوری طراحی و پیاده‌سازی شد که محدودیت‌های مربوط به شیب در تولید جمعیت اولیه و طی نسل‌های متوالی در نظر گرفته شود. همچنین تولید جمعیت اولیه به دو صورت بدون راهنمایی و با راهنمایی از حیث محدوده مساحتی کلاس‌های مختلفی کاربری اراضی انجام پذیرفت، به طوری که جمعیت اولیه تولید شده در فضای موثر یا نزدیک به آن - قرار گرفتند. به علاوه، عملکرد هر یک از عملگرهای تقاطع نیز ارزیابی شد. لازم به توضیح است که وضعیت موجود کاربری مسکونی و رودخانه ثابت در نظر گرفته شد. همچنین در همه اجراها اندازه جمعیت اولیه، احتمال تقاطع و احتمال جهش به ترتیب ۲۰۰ و ۰/۸ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شد.

#### ۴- نتایج و بحث

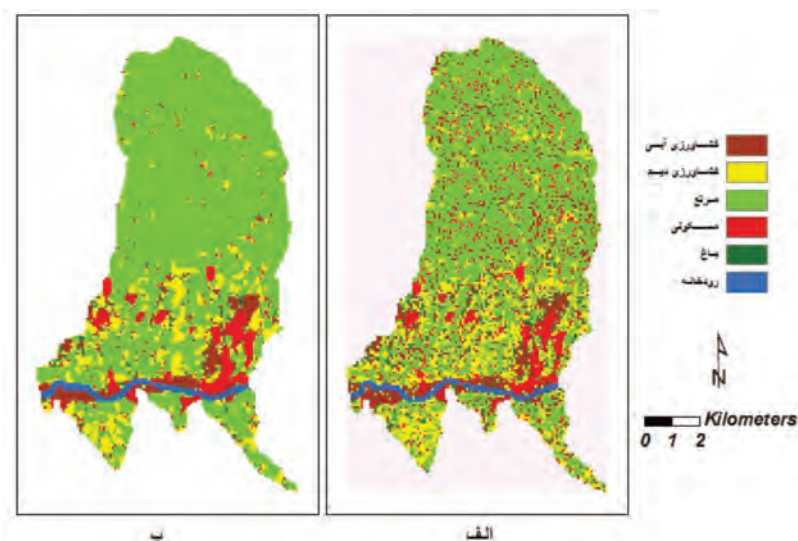
##### ۴-۱- اجرای مدل بدون راهنمایی در تولید

##### جمعیت اولیه

ابتدا الگوریتم NSGA-II با استفاده از عملگرهای



شکل ۹- الف) نقشه حاصل از عملگر UC بدون راهنمایی؛ و ب) نقشه حاصل از عملگر TDC بدون راهنمایی



شکل ۱۰. الف) نقشه حاصل از عملگر UC با راهنمایی ب) نقشه حاصل از عملگر TDC با راهنمایی

توزیع کلاس‌ها در شکل ۱۰-ب با وضعیت موجود (شکل ۲) هم‌خوانی بیشتری دارد. همچنین بررسی مقادیر توابع هدف نشان داد که نقشه حاصل از TDC دارای تناسب و فشردگی - سازگاری بالاتر، فرسایش و رواناب کمتر است؛ هر چند به لحاظ بازدهی اقتصادی نقشه حاصل از UC مقدار بالاتری به خود اختصاص داده است که دلیل آن اشغال مساحت بیشتر به‌وسیله کاربری مسکونی است.

#### ۴-۳- محاسبه میزان سود و فرسایش قبل و بعد از بهینه‌سازی

محاسبات مربوط به سود و نیز برآوردهای میزان فرسایش در قبل و بعد از بهینه‌سازی در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. طبق جدول ۲ کاربری مرتع با حدود ۷۵ درصد بیشترین سطح را دارد و کاربری باغ‌ها با ۲/۶ درصد کمترین سطح را. همان‌گونه که از داده‌های جدول ۲ مشخص است، میزان فرسایش در اراضی کشت دیم بیشتر از بقیه کاربری‌هاست. بعد از آن به ترتیب اراضی مسکونی و آبی و باغ‌ها، و در نهایت اراضی مرتعی کمترین میزان فرسایش را دارند.

#### ۴-۲- نتایج اجرای مدل با راهنمایی در تولید جمعیت اولیه

تولید جمعیت اولیه موجه یا نزدیک به موجه، و استفاده UC با پارامترهای ثابت قبلی نشان داد که مدل فاقد توانایی همگرا مناسب است، به طوری که بعد از ۷۰۰۰ تکرار، تفاوت چندانی در نتیجه مشاهده نگردید و حداکثر ۳۶ جواب موجه تولید گردید. به عبارت دیگر، در ۳۶ جواب تولید شده از ۲۰۰ جواب، محدودیت مساحت همه کاربری‌ها رعایت شده بود. البته می‌بایست زمان محاسباتی کم نیز در استفاده از عملگر UC مورد توجه قرار گیرد. استفاده از عملگر TDC با شرایط ثابت قبلی باعث افزایش زیاد همگرایی گردید، به طوری که تمامی جواب‌ها در ناحیه موجه قرار گرفتند. بنابراین می‌توان گفت در تعداد تکرار برابر، عملگر TDC کارکردی بهتر از عملگر UC دارد. شکل ۱۰ وضعیت جمعیت تولید شده از الگوریتم NSGA-II را با استفاده از عملگر UC و TDC نشان می‌دهد.

همان‌طور که شکل ۱۰-الف نشان می‌دهد، در کروموزوم‌های حاصل از عملگر UC حتی در مواردی که محدودیت‌ها نقض نشده‌اند، ژن‌ها یا همان کلاس‌های کاربری توزیع مناسبی ندارند. این در حالی است که

جدول ۲. میزان فرسایش و سود در وضعیت کاربری موجود حوضه آبخیز طالقان

سود کل ( $10^3 R/y$ )	فرسایش سالانه (t)	سود خالص ( $10^3 R/ha.y$ )	فرسایش هر کاربری (t/ha.y)	درصد مساحت	مساحت (ha)	کاربری اراضی
۲۶۸۰	۳۵۲۷	۵۴۶۳ / ۱	۷/۱۹	۵ / ۷	۴۹۰ / ۵۷	اراضی آبی
۲۶۴۰	۹۴۵۴	۲۷۰۸ / ۱	۹ / ۷۰	۱۱ / ۵	۹۷۴ / ۶۵	اراضی دیم
۴۸۳۶	۳۹۱۷۹	۷۴۱ / ۷۸	۶ / ۰۱	۷۵ / ۵	۶۵۱۹ / ۱	مرتع
۹۸۶۲۵	۲۰۶۴	۳۷۵۰۰۰	۷ / ۸۵	۴ / ۴	۲۶۳	مسکونی
۱۲۳۵	۱۶۲۶	۵۴۶۳ / ۱	۷/۱۹	۲ / ۶	۲۲۶ / ۱۴	باغات
۱۱۰۰۱۶	۵۵۸۵۲			۱۰۰	۸۴۷۳ / ۴۶	کل

جدول ۳. میزان فرسایش و سود بعد از اجرای مدل بهینه‌سازی در حوضه آبخیز طالقان

سود کل ( $10^3 R/y$ )	فرسایش سالانه (t)	سود خالص ( $10^3 R/ha.y$ )	درصد تغییر مساحت	درصد مساحت	مساحت (ha)	کاربری اراضی
۱۸۶۴	۲۴۵۳	۵۴۶۳ / ۱	-۳۰/۴۶	۵ / ۷	۳۴۱ / ۱۲	اراضی آبی
۱۴۵۳	۵۲۰۵	۲۷۰۸ / ۱	-۴۴/۹۴	۱۱ / ۵	۵۳۶ / ۶۵	اراضی دیم
۵۲۵۶	۴۲۵۸۲	۷۴۱ / ۷۸	۸ / ۶۸	۷۵ / ۵	۷۰۸۵ / ۱۷	مرتع
۱۲۴۲۶۷	۲۶۰۱	۳۷۵۰۰۰	۲۶	۴ / ۴	۳۳۱ / ۳۸	مسکونی
۹۷۹	۱۲۸۸	۵۴۶۳ / ۱	-۲۰/۷۸	۲ / ۶	۱۷۹ / ۱۴	باغات
۱۳۳۸۱۹	۵۴۱۲۹			۱۰۰	۸۴۷۳ / ۴۶	کل

درصد کاهش مساحت با حدود ۴۵ درصد کاهش متعلق به اراضی دیم و اراضی آبی و باغ‌ها به ترتیب با ۳۰/۴۶ و ۲۰/۷۸ درصد کاهش مساحت در رتبه‌های بعدی قرار دارند. داده‌ها و اطلاعات جدول مذکور نشان می‌دهند که میزان فرسایش بعد از اجرای مدل بهینه‌سازی نسبت به میزان قبل از آن، با ۱۷۲۲ تن در سال (۳/۰۸ درصد) کاهش یافت و از ۵۵۸۵۲ تن در سال به ۵۴۱۲۹ تن در سال رسید. شکل ۱۱ تغییرات میزان فرسایش قبل و بعد از بهینه‌سازی را در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد. این نتایج با نتایج آقارسی و قدوسی (۲۰۰۱) تا حد زیادی هم‌خوان است و با نتایج ابراهیمی و همکاران (۲۰۰۱) و نتایج سروی و همکاران (۲۰۰۷) در حوضه طالقان مشابهت دارد.

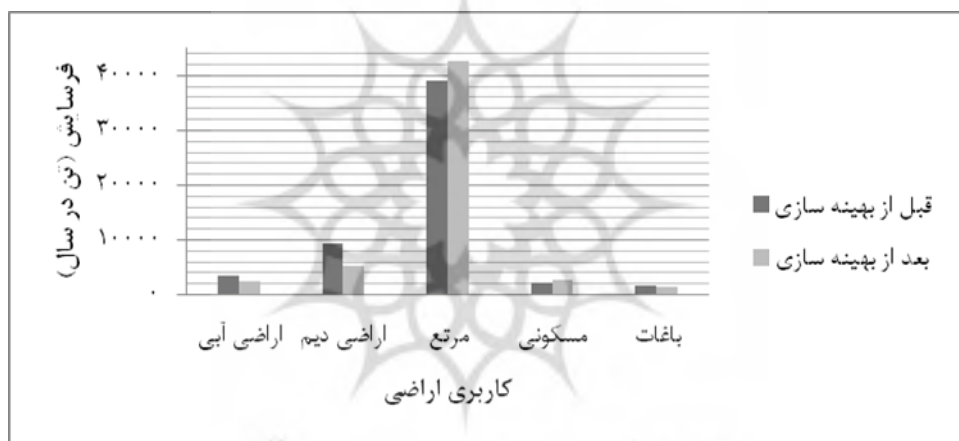
همچنین میزان بازدهی اقتصادی در کاربری مسکونی بیشتر از بقیه کاربری‌هاست. پس از آن هم به ترتیب اراضی آبی و باغ‌ها و اراضی دیم و در نهایت اراضی مرتعی کمترین میزان بازدهی اقتصادی را دارند. همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد، کاربری مرتع اگرچه کمترین میزان بازدهی اقتصادی را در واحد سطح دارد، اما چون دارای بیشترین مساحت (۶۵۱۹/۱ هکتار) است، رتبه دوم سود کل را بعد از کاربری مسکونی دارد.

مقایسه سطوح اختصاص یافته به هر کاربری در قبل و بعد از بهینه‌سازی، مشخص ساخت که مساحت کاربری‌های کشاورزی و باغ‌ها کاهش یافته است و مساحت کاربری‌های مرتع و مسکونی افزایش. بیشترین

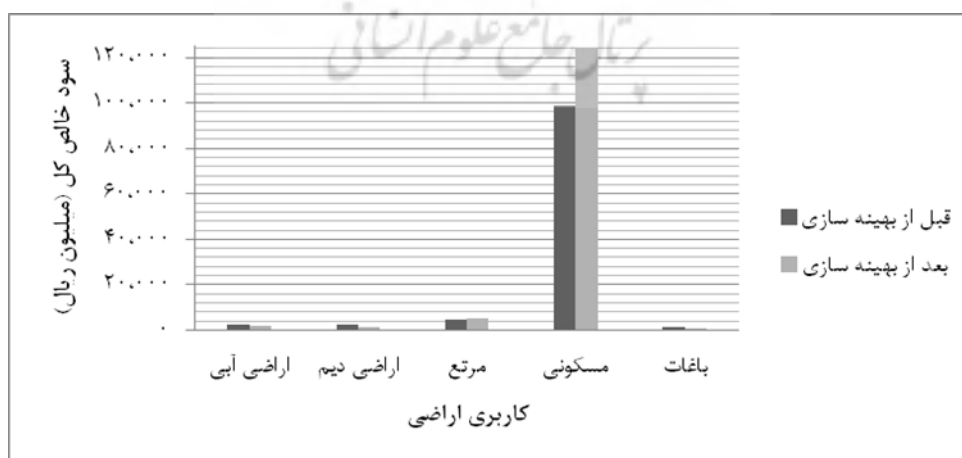
سودآوری پس از بهینه‌سازی کاربری اراضی همخوانی ندارد؛ و دلیل آن در نظر گرفتن کاربری مسکونی در این تحقیق است؛ اما با نتایج تحقیق جلیلی و همکاران (۲۰۰۷) در حوضه بریموند کرمانشاه همخوانی دارد.

همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، بعد از بهینه‌سازی دو کاربری مسکونی و مرتع به سبب افزایش مساحت نسبت به وضعیت موجود با افزایش میزان بازدهی اقتصادی مواجه شده‌اند. در این بین بیشترین میزان افزایش بازدهی اقتصادی متعلق به اراضی مسکونی است. شکل نیز نشان می‌دهد که بازدهی اقتصادی در باغ‌ها و اراضی آبی و دیم کاهش یافته است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، بعد از بهینه‌سازی میزان کاهش فرسایش متعلق به اراضی دیم بیش از همه بوده است. اراضی آبی و باغ‌ها نیز در رتبه‌های بعدی کاهش میزان فرسایش - به سبب کاهش مساحت نسبت به وضعیت موجود - قرار دارند. بررسی جدول ۲ و ۳ و شکل ۱۲ نشان می‌دهد که میزان سوددهی کل در منطقه مورد مطالعه بعد از اجرای مدل بهینه‌سازی از ۱۱۰۰۱۶ میلیون ریال در سال به ۱۳۳۸۱۹ میلیون ریال رسیده و به عبارت دیگر، ۲۱/۶ درصد افزایش میزان سوددهی داشته است. این نتایج با نتایج تحقیق سروی و همکاران (۲۰۰۹) در حوضه طالقان در زمینه کاهش ۱۰/۸۲ درصدی



شکل ۱۱. تغییرات میزان فرسایش قبل و بعد از بهینه‌سازی کاربری



شکل ۱۲. تغییرات میزان سوددهی قبل و بعد از بهینه‌سازی کاربری

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شد تا مجموعه‌ای از نقشه‌های کاربری اراضی با در نظر گرفتن تأثیر کاربری اراضی بر رواناب و میزان فرسایش و اشتغال‌زایی، تولید شود.

نتایج حاصل از اجرای مدل بدون راهنمایی اولیه در خصوص نسبت مساحتی کاربری‌ها، نشان داد که در مدیریت کاربری اراضی، کارکرد عملگرهای تقاطع تحت تأثیر شرایط اولیه است. از آنجا در جمعیت اولیه تولید شده، حد مجاز نسبت مساحت مربوط به هر کاربری در نظر گرفته نشده است، مدل با اتکا به عملگرهای موجود نمی‌تواند از این وضعیت خارج گردد. احتمالاً با تغییر ساختار مدل و وارد کردن حد مجاز نسبت مساحت کاربری‌ها به عنوان تابع هدف، می‌توان بر این مشکل غلبه کرد. استفاده از عملگر UC به این دلیل که موجب تولید جواب‌های ناموجه زیادی می‌شود، سرعت همگرایی کلی را کاهش داده است.

استفاده از تقاطع TDC با جمعیت اولیه موجه یا نزدیک به موجه به همراه عملگر جهش و پارامترهای تعیین شده، موجب بهبود فراوان نتایج گردید. توانایی همگرایی الگوریتم افزایش یافت و تقریباً همه جواب‌ها در فضای موجه قرار گرفتند. همچنین نقشه تولیدشده (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که به لحاظ پیوستگی قطعات کلاس‌های مختلف کاربری، عملگر TDC کارکردی بهتری از UC دارد.

نتایج نشان داد به منظور افزایش سرعت جست‌وجوی جواب‌های بهینه و جواب‌های ممکن، نیاز به راهنمایی سیستم از طریق جواب‌های اولیه به چشم می‌خورد.

پیشنهاد می‌شود که مقدار پارامتر جریمه ثابت در نظر گرفته نشود و شیوه‌هایی ابداع گردد که این پارامتر در الگوریتم ژنتیک چند هدفه طی نسل‌های مختلف به صورت متناسب تغییر کند. از آنجا که نحوه محاسبه و اعمال پنالتی تأثیر زیادی در برآزش جواب‌ها و نتایج دارد، بررسی تأثیر انواع دیگر تابع جریمه درخور توجه خواهد بود. طراحی عملگر تقاطع دوبعدی می‌بایست به

گونه‌ای باشد که مساحت بلوک انتخابی نه آن قدر بزرگ باشد که جواب مسئله را از حالت موجه یا نزدیک موجه دور کند و نه آن قدر کوچک که تأثیری نداشته باشد. از آنجا که تغییر کاربری اراضی در جهان واقعی به این صورت است که افزایش مساحت یک کاربری به کاهش مساحت کلاس دیگر منجر می‌شود، اگر عملگر تقاطعی با توجه به این اصل طراحی گردد، به احتمال بسیار زیاد نتایج بهتری به دست خواهد آمد. همچنین نیاز است روالی تعریف شود که با استفاده از مکانیسمی مکانی، تعداد مناسبی جواب از بین N جواب نهایی به دست آید. از آنجا که اندازه مناسب جمعیت در الگوریتم ژنتیک نقش مهمی در جست‌وجو دارد، پیشنهاد می‌شود تحقیق‌هایی در این زمینه انجام پذیرد. به‌طور کلی می‌توان گفت که مدل ارائه‌شده توانایی خوبی در یافتن جواب‌های چندگانه بهینه بده بستان با دامنه گسترده‌ای از مقادیر برای توابع هدف را دارد؛ زیرا بر طبق نتایج این مطالعه، بهینه‌سازی کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه علاوه بر کاهش فرسایش، موجب فزونی میزان سوددهی کلی نیز شده است. همچنین محاسبات نشان داد که مقدار رواناب کاهش یافته است، و این با کاهش فرسایش همخوانی دارد.

## ۶- منابع

Agharazi, H., Ghoddosi, J., 2001, **Assessment of Relationship Between Land Use and Slope with Erosion and Sediment Production**, Proceedings of the National Conference on Land Management- Soil erosion and sustainable development, PP. 362-368.

Arzani H., MirAkhoorlou KH., Hosseini S.Z., 2009, **Land Use Mapping Using the Landsat 7 (ETM+) Data (part of the ranges of the Taleghen Basin**, Iranian Journal of Rang and Desert Research, Vol 16, 2, PP. 150-160.



- Bavi O., Salehi M., 2008, **Genetic Algorithms & Optimization of Composite Structure**, Abed Publication, Tehran.
- Bazargan-Lari, M.R., Kerachian R., Sedghi H., Fallahnia M., Abed E A., Nikoo M.R., 2010, **Developing Probabilistic Operating Rules for Real-time Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources: Application of Support Vector Machines**, J. of Water and Wastewater, 4, PP. 54-69 (In Persian).
- Briassoulis H., 2000, **Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches**, <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis.htm>.
- Coello C.A.C., Lamont G.B., Veldhuizen D.A.V., 2007, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**, Second Edition, Springer, Urbana, Illinois, USA.
- Daamen C., Clifton C., Hill P., Nathan R., Ryan H., 2003, **Modelling the Impact of Land Use Change on Regional Hydrology**, 28th. International Hydrology and Water Resources Symposium, 10 - 14 November 2003, Wollongong, NSW.
- Deb K., Datta D., Fonseca C.M., Lobo F.G., Conrado P.A., Seixas J., 2007, **MultiObjective Evolutionary Algorithm for Land-Use Management Problem**, International Journal of Computational Intelligence Research, PP. 371-384.
- Datta, D. and Deb, K., 2006, **Design of Optimum Cross-sections for Loadcarrying Members Using Multi-objective Evolutionary Algorithms**, Int. J. of Systemics, Cybernetics and Informatics (IJSCI), PP. 57-63.
- Datta, D., 2007, **Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Resource Allocation Problems**, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur (IIT-Kanpur), Indian.
- Deb, K., 2001, **Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, Wiley, New York.
- Deb K., Kumar A., 1995, **Real-coded Genetic Algorithms with Simulated Binary Crossover: Studies on Multimodal and Multiobjective Problems**, Complex Systems, 9, PP. 431-454.
- Deb K., Mohan M. Mishra S., 2005, **Evaluating the Domination Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm for a Quick Computation of Pareto-Optimal Solutions**, Evolutionary Computation, 13(4), PP. 501-525.
- Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T., 2002, **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), PP. 182-197.
- Ebrahimi, N., Davoodi, A.A., Ghoddosi, J., 2001, **Effect of Different Exploitation of Land on Erosion and Sedimentation in the Ghareh Kahriz Watershed of Arak**, Proceedings of the National Conference on Land Management- Soil erosion and sustainable development, PP. 177-190.
- Huston M., 2006, **The Need for Science and**

- Technology in Land Management**, Online Book: The International Development Research Centre. [http://www.idrc.ca/en/ev-29587-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://www.idrc.ca/en/ev-29587-201-1-DO_TOPIC.html).
- Jalili, KH., Sadeghi, S.H.R., Nikkami, D., 2007, **Land Use Optimization of Watershed for Soil Erosion Minimization Using Linear Programming (a Case Study of Brimvand Watershed, Kermanshah Province)**, Journal of Agricultural Science and Technology, 10 (4), PP. 15-27.
- Kai C., Boa H., 2010, **Comparison of Spatial Compactness Evaluation Methods for Simple Genetic Algorithm Based Land Use Planning Optimization Problem**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII – Part 2, ISSN 1682-1777.
- Karamouz, M., Rezapour Tabari, M.M., and Kerachian, R., 2007, **Application of Genetic Algorithm and Artificial Neural Networks in Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources**, Water International, 32, PP. 163-176.
- Mohseni S., M., Ahmadi, H., Vafakhah, M., 2009, **Optimization of Landuse for Soil Erosion Minimum by using Geographic Information System in Taleghan Watershed**, Natural Resources Faculty-Range and Watershed Management Department-Center of Excellence for Sustainable Watersheds Management.
- Refahi, H.G., 2006, **Soil Erosion by Water & Conservation**, Tehran University publications (in Persian).
- Rajabi, M.R., Mansourian A., Alimohamadi A., Talei M., 2010, **Spatial Optimization of Urban Design and Planning Process by Development of Innovative Operators in NSGA-II**, Iranian Remote Sensing & GIS, 2(3), PP. 21-42.
- Rezapour Tabari, M.M., Maknoon, R., and Ebadi, T., 2009, **Multi-objective Optimal Model for Surface and Groundwater Conjunctive Use Management Using SGAs and NSGA-II**, J. of Water and Wastewater, 69, PP. 2-12, (In Persian).
- Rezaei, J., Davoodi M.M., 2009, **Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, translation, Pelk, Tehran.
- Stewart, T.J., Janssen, R., & Herwijnen, M.V., A **Genetic Algorithm Approach to Multiobjective Land use Planning**, Computers & Operations Research, 2004, 31, 2293-2313.
- Terrence, J.T., Geoge R.F. and Kenneth, G.R., 2001, **Soil Erosion**, John Wiley and Sons INK. USA, 338pp.
- Villalta C.C., 2009, **Multi-objective Optimization Approach for Land Use Allocation Based on Water Quality Criteria**, Ph.D. Dissertation. The Puerto Rico University.
- Yee, K.Y., Ray, A.K. and Rangiah, G.P., 2003, **Multi-objective Optimization of Industrial Styrene Reactor**, Computers and Chemical Engineering, Vol. 27 (2003), PP. 111-130.