University Course Timetabling using Constraint Programming

Hadi Shahmoradi[1], Saeideh Ketabi[2*], Majid Esmaelian[3]

1 Department of Management, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2 Department of Management, University of Isfahan, Isfahan, Iran

3 Department of Management, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract:

University course timetabling problem is a challenging and time-consuming task on the overall structure of timetable in every academic environment. The problem deals with many factors such as the number of lessons, classes, teachers, students and working time, and these are influenced by some hard and soft constraints. The aim of solving this problem is to assign courses and classes to teachers and students, so that the restrictions are held. In this paper, a constraint programming method is proposed to satisfy maximum constraints and expectation, in order to address university timetabling problem. For minimizing the penalty of soft constraints, a cost function is introduced and AHP method is used for calculating its coefficients. The proposed model is tested on department of management, University of Isfahan dataset using OPL on the IBM ILOG CPLEX Optimization Studio platform. A statistical analysis has been conducted and shows the performance of the proposed approach in satisfying all hard constraints and also the satisfying degree of the soft constraints is on maximum desirable level. The running time of the model is less than 20 minutes that is significantly better than the non-automated ones.

Keywords: Constraint programming; Timetabling; Constraint satisfaction problem; Hard constraint; Soft constraint

Archive of SID

www.SID.ir

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی(۱٤)، شماره (۱)، بهار و تابستان ۱۳۹٦
دریافت:۱۳۹۳/۰۷/۲۷ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۷
صص: ۱۳۸-۱۱۹

زمان‌بندی دروس دانشگاه با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت

هادی شاهمرادی[۱]، سعیده کتابی[۲]*، مجید اسماعیلیان[۳]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مدیریت، دانشگاه اصفهان
۲- دانشیار، گروه مدیریت، دانشگاه اصفهان
۳- استادیار، گروه مدیریت، دانشگاه اصفهان

چکیده: مسئلهٔ جدول زمان‌بندی دروس دانشگاه، یکی از مسائل زمان‌بر در هر محیط آموزشی است. این مسئله با عوامل زیادی نظیر تعداد دروس، کلاس، استاد، دانشجو و زمان‌های کاری سروکار دارد و محدودیت‌های سخت و نرم زیادی بر این عوامل تأثیر می‌گذارند. هدف از حل این مسئله انتساب دروس و کلاس به استاد و دانشجو است؛ به‌گونه‌ای که در محدودیت‌های مسئله صدق کنند. این پژوهش از رویکرد برنامه‌ریزی محدودیت برای حل این مسئله استفاده می‌کند. هدف این پژوهش، ارضای حداکثری انتظارات و محدودیت‌ها به‌منظور ایجاد یک جدول زمان‌بندی است. مدل پیشنهادی، از تابع هزینه‌ای برای حداقل‌سازی تخطی از محدودیت‌های نرم استفاده می‌کند که ضرایب این تابع از روش AHP محاسبه می‌شوند. این مدل برای گروه مدیریت دانشگاه اصفهان، با زبان برنامه‌نویسی OPL و بر روی پلتفرم IBM ILOG CPLEX اجرا شد. جدول زمان‌بندی حاصل‌شده، با ارضای کامل محدودیت‌های سخت و ارضای کاملاً رضایت‌بخش محدودیت‌های نرم همراه بود. این جدول زمان در مدت‌زمان کمتر از ۲۰ دقیقه به دست آمد که در مقایسه با زمان صرف‌شده در مدل‌های فراابتکاری و سایر مدل‌های ریاضی پیشنهادشده برای این مسئله، بسیار قابلِ‌ملاحظه است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی محدودیت، جدول زمان‌بندی، مسئلهٔ ارضای محدودیت، محدودیت سخت، محدودیت نرم.

*نویسنده مسئول: سعیده کتابی
پست الکترونیک: sketabi@ ase.ui.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

مسئلهٔ جدول زمان‌بندی دروس دانشگاهی (UCTP[1])، در زمرهٔ مسائل مهم و زمان‌بر در هر محیط آموزشی به شمار می‌آید. زمان‌بندی و برنامه‌ریزی چیدمان دروس در جدول هفتگی، براساس معیارها و امکانات محیط، مشخصات دروس و ساعات حضور استادان صورت می‌گیرد. به‌طور کلی UCTP، عبارت است از انتساب ساعات تدریس استادان و نیز کلاس‌های موجود به یک مجموعه بازهٔ زمانی؛ به‌نحوی که در مجموعه‌ای از شرایط صدق کند (کازارلیس[2] و همکاران، ۲۰۰۵). در یک UCTP، برگزاری هم‌زمان دو درس با دانشجویان یک گروه آموزشی یا تدریس یک استاد در یک بازهٔ زمانی یکسان با دروس متفاوت را تداخل گویند. در حالت کلی هدف از بررسی، کاهش تعداد تداخل بین دروس دانشجویان یک گروه آموزشی و یا تدریس یک استاد و همچنین رفع هم‌زمانی دروسی است که به یک اتاق مشترک نیاز دارند (لوئیس[3]، ۲۰۰۸). با افزایش تعداد محدودیت‌های برنامه‌ریزی، رسیدن به یک جواب قابلِ‌قبول، بسیار مشکل خواهد بود؛ بنابراین هدف زمان‌بندی دروس، ایجاد یک برنامهٔ زمانی معتبر و قابل‌اجرا با حداقل تداخل است.

مسئلهٔ زمان‌بندی دروس دانشگاهی در همهٔ حالات از نظر پیچیدگی محاسباتی به کلاس NP–hard تعلق دارد؛ بنابراین الگوریتمی با پیچیدگی زمانی از مرتبهٔ چندجمله‌ای برای حل آن ارائه نشده است. برای حل مسائل زمان‌بندی می‌توان از الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی استفاده کرد. الگوریتم‌های دقیق برای حل این‌گونه مسائل، غیرعملی هستند؛ چرا که زمان اجرای این دسته از الگوریتم‌ها با رشد اندازهٔ مسئله به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد (گری و جانسون[4] ۲۰۰۲)؛ بنابراین از الگوریتم‌های تقریبی مانند الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده می‌شود. از جملهٔ این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک[5]، جستجوی ممنوع[6] و کلونی زنبورعسل[7] اشاره کرد. (یانگ و جَت[8]، ۲۰۱۱) ،(لو و هاو[9]، ۲۰۱۰) ، (صابَر و همکاران[10]، ۲۰۱۲) و(میرحسنی، ۲۰۰٦).

یکی دیگر از رویکردهای حل مسائل جدول زمان‌بندی، برنامه‌ریزی محدودیت است. این رویکرد یک الگوی حل مسئله است که میان محدودیت‌های مسئله و الگوریتم‌های جستجو تمایز قائل شده است (ماریوت و استاکی[11]، ۱۹۹۸). الگوریتم‌های جستجو اغلب با استفاده از شناسایی حالات متفاوت محدودیت‌ها و الگوریتم‌های انتشار محدودیت،[12] ممکن می‌شود.

مسائل ارضای محدودیت (CSP[13])، چارچوبی واحد برای مسائل مختلف محاسباتی که ماهیتاً در حوزهٔ هوش‌مصنوعی و بهینه‌سازی ترکیبیاتی هستند، ارائه می‌کند. این مسائل که نمونه‌ای از مسائل با دامنهٔ محدود است، لیستی از متغیرها و محدودیت‌ها را شامل می‌شود؛ به‌طوری که مقادیر ممکن از دامنه را به متغیرها مرتبط می‌کند و بیان می‌کند که آیا متغیرها قادر هستند مقادیری بگیرند که به‌طور هم‌زمان همهٔ محدودیت‌ها را ارضا کنند یا خیر (زیونی[14]، ۲۰۱۲).

در ادامهٔ مقاله و در بخش دوم خلاصه‌ای از کارهای صورت‌گرفته در حوزهٔ جدول زمان‌بندی آموزشی آمده است. بخش سوم مفاهیم مسئله جدول زمان‌بندی و رویکردهای حل آن به‌همراه برنامه‌ریزی محدودیت، مسئلهٔ ارضای محدودیت و الگوریتم‌های جستجوی آن بیان شده است. در بخش چهارم مدل پیشنهادی تشریح می‌شود. بخش پنجم به مطالعهٔ

Archive of SID

www.SID.ir

موردی پژوهش اختصاص یافته و در بخش ششم نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی مدل در مطالعهٔ موردی بررسی قرار گرفته می‌شود. در بخش هفتم مقاله، پیشنهادهایی جهت کارهای آینده ارائه می‌شود.

۲- ادبیات و پیشینهٔ پژوهش

در چند دههٔ گذشته پژوهشگران وگروه‌های پژوهشی هوش‌مصنوعی و پژوهش عملیاتی، تلاش‌های بسیاری به‌منظور خودکارسازی روند زمان‌بندی انجام داده‌اند(بارتاک[۱۵] ۲۰۰۰) و (ریس و الیویرا[۱۶]، ۲۰۰۱). ماریوت و اسکاتی (۱۹۹۸) منطق برنامه‌ریزی محدودیت را برای زمان‌بندی امتحانات دانشگاهی به کار گرفتند.پژوهش آنها تأییدی بر پتانسیل منطق برنامه‌ریزی محدودیت برای نمونه‌سازی و اجرای برنامه‌های کاربردی در زندگی واقعی بود. آنها همچنین توانایی به‌کارگیری بیش از ۳۰۰۰ محدودیت را از ویژگی‌های برتر برنامه‌ریزی محدودیت برشمردند. روادا و مری[۱۷] (۲۰۰۳) از محدودیت‌های وزن‌دار در مدل برنامه‌ریزی محدودیت خود برای حل این مسئله استفاده کردند. این مدل به‌طور کلی برای هر نوع محدودیت اولویت قائل می‌شود و موجودیت‌های درون هر محدودیت را وزن‌دار نکرده است. لو و هاو (۲۰۱۰) در پژوهش خود یک الگوریتم جستجوی ممنوع تطبیقی برای حل مسئلهٔ زمان‌بندی دروس ارائه داد. نتایج بهینه‌بودن این الگوریتم با پیاده‌سازی یک مجموعه دادهٔ مشخص به‌همراه مقایسهٔ آن با سایر الگوریتم‌ها نیز در پژوهش آمده است . صابر و همکاران (۲۰۱۲) یک الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورعسل را برای حل مسئلهٔ زمان‌بندی دروس دانشگاهی ارائه کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی این الگوریتم بر جدول زمان‌بندی امتحانات و دروس نشان می‌دهد که این الگوریتم، قابل‌اعتماد است و برای حل مسائل زمان‌بندی، دانشگاه معتبر خواهد بود . البتر و همکاران[۱۸] (۲۰۱۲) در پژوهش خود از الگوریتم ممتیک[۱۹] برای مسئلهٔ زمان‌بندی دروس دانشگاهی استفاده کردند. در این رویکرد، یک الگوریتم جستجوی هماهنگ ترکیبی[۲۰] (HHSA) به کار گرفته شده است؛ به‌گونه‌ای که الگوریتم HSA که یک رویکرد فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است اولاً با الگوریتم تپه‌نوردی[۲۱] ترکیب شده تا بتواند کاوش محلی خود را توسعه دهد و ثانیاً با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۲۲] ترکیب می‌شود تا همگرایی را ارتقا دهد. نتایج حاصل از این پیاده‌سازی بهینه‌بودن این رویکرد را نشان می‌دهد؛ بنابراین پیش‌بینی شده است این رویکرد برای مجموعه داده‌های پیچیده نیز جوابی بهینه حاصل کند . هواس و همکاران[۲۳] (۲۰۱۳) مدلی برای حل مسائل زمان‌بندی دروس دانشگاهی با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه دادند. در این مدل محدودیت‌ها، نیازمندی‌های جدول زمان‌بندی را برای ایجاد یک زمان‌بندی معتبر، مهیا می‌کنند. همچنین در این پژوهش، تابع هدف، انعکاس ترجیحات دانشجویان و استادان است. نتایج حاصل از پژوهش نشان‌دهندهٔ ارضای تمامی محدودیت‌های سخت و نرم است . منجمی و همکاران (۱۳۸۵) در پژوهش خود از خصوصیات الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزاری مناسب در بهینه‌سازی پاسخ‌های یک مسئله CSP استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در طراحی جداول زمان‌بندی خوش‌ساخت برای یک دانشکدهٔ مفروض به‌خوبی عمل می‌کند. رحمانی (۱۳۸٦) در پژوهش خود، الگوریتم ممتیک را ارائه کرد. این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری داشت. نتایج حاصل، گویای این است

Archive of SID

www.SID.ir

که روش پیشنهادی این پژوهش، می‌تواند بر روند اجرای الگوریتم تأثیر بسیار مؤثری داشته باشد و همچنین زمان همگرایی کروموزوم‌ها را به سمت پاسخ بهینه به حداقل برساند. غافری (۱۳۸۹) در پژوهش خود درزمینهٔ زمان‌بندی دروس دانشگاهی، رویکرد استفاده از گراف‌ها را در پیش گرفته است. در این رویکرد برای ارضای تعدادی از محدودیت‌های سخت از الگوریتم رنگ‌آمیزی گراف و سپس، سایر محدودیت‌های سخت و نرم توسط الگوریتم ژنتیک به‌کاررفته در حین استفاده از الگوریتم رنگ‌آمیزی استفاده شده است. این عمل باعث بالاتررفتن احتمال حصول نتیجهٔ الگوریتم رنگ‌آمیزی گراف و بالاتررفتن سرعت به‌نتیجه‌رسیدن الگوریتم ژنتیک شده است. رستگارامینی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهش خود، یک مدل ریاضی صفر یک برای مسئلهٔ زمان‌بندی آموزشی ارائه دادند. در این مدل، ترجیحات استاد دربارهٔ بازه‌های زمانی، موضوعات درسی و یک تابع هدف جدید که کمینه‌سازی تعداد دروس هم‌زمان با دانشجویان مشترک میسر می‌سازد، ارائه شده است. کارایی روش مطرح‌شده با افزایش ابعاد مسئله کاهش می‌یابد؛ بنابراین یک الگوریتم فراابتکاری سیستم کلونی مورچگان برای حل این مسئله ارائه شده است.

۳- مسئلهٔ جدول زمان‌بندی آموزشی و برنامه‌ریزی محدودیت

در این بخش ابتدا مفاهیم اولیهٔ برنامه‌ریزی آموزشی مطرح شده، رویکردهای حل آن به‌طور مختصر معرفی می‌شود و سپس برنامه‌ریزی محدودیت و مفاهیم موجود در آن بیان می‌گردند.

۳-۱- مسئلهٔ جدول زمان‌بندی آموزشی

طراحی و پیاده‌سازی جدول زمان‌بندی دانشگاهی، نیازمند انطباق با نیازها و قوانین دانشگاه و ذی‌نفعان است. در بسیاری از دانشگاه‌ها، حل مسائل جدول زمان‌بندی به عهدهٔ مسئولان آموزش است. این برنامه با سعی و خطا حاصل شده است و مسلماً راه‌حل مناسبی برای حل این‌گونه مسائل نخواهد بود. در چنین شرایطی می‌توان با بهره‌گیری از فناوری‌های مهندسی و ریاضی، سیستمی مکانیزه ارائه کرد که به‌صورت خودکار بتواند جدول زمان‌بندی را حل کند (میرحسنی، ۲۰۰٦).

پژوهشگران، محدودیت‌های موجود در یک مسئلهٔ جدول زمان‌بندی دروس دانشگاهی را به دو دسته تقسیم‌بندی کرده‌اند (لیس و میکلون،[24] ۲۰۰۸):

۱) محدودیت‌های سخت که نقض آنها منجر به امکان‌ناپذیری برنامهٔ هفتگی یا نامطلوب‌شدن آن به‌میزان زیاد می‌شود. نمونه‌ای از این محدودیت، تداخل زمانی دو درس در یک اتاق است؛

۲) محدودیت‌های نرم که قابلیت نقض‌شدن دارند، ولی نقض هرکدام از آنها از مطلوبیت برنامه می‌کاهد. محدودیت‌های نرم، به آن دسته از محدودیت‌هایی اطلاق می‌شود که به سیاست‌های دانشگاه و نیاز افراد توجه دارد؛ رعایت این محدودیت‌ها مطلوب بوده اما ارضای آنها اجباری نیست. در مجموع، محدودیت‌های سخت دارای اولویت بالاتری نسبت به محدودیت‌های نرم هستند و یک جدول زمان‌بندی، زمانی قابل‌قبول است که همهٔ محدودیت‌های سخت آن ارضا شده باشند. هرچه محدودیت‌های نرم بیشتر ارضا بشنود، جدول زمان‌بندی حاصل، از مطلوبیت بیشتری برخوردار خواهد بود. در بخش بعد رویکردهای حل مسئلهٔ جدول زمان‌بندی دروس دانشگاهی آمده است.

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۲- رویکردهای حل مسئلهٔ جدول زمان‌بندی

با نگاه کلی به مسئلهٔ جدول زمان‌بندی دانشگاهی، برداشت می‌شود که برای حل مسائل جدول زمان‌بندی لازم است در ابتدا توصیفی از مسئله وجود داشته باشد. بعد از توصیف، مسئله باید پیش‌پردازش شود. در این مرحله اعتبار داده‌ها بررسی می‌شود، همچنین مسئله به چند بخش برای حل ساده‌تر تقسیم می‌شود. سپس متناسب با هر بخش الگوریتمی به‌منظور حل آن انتخاب می‌شود و درنهایت جواب نهایی حل جدول زمان‌بندی شکل می‌گیرد. رویکردهای بسیاری برای حل مسائل جدول زمان‌بندی وجود دارند؛ از جملهٔ این رویکردها می‌توان به برنامه‌ریزی خطی (LP)، رویکردهای ابتکاری و فراابتکاری اشاره کرد که سابقه‌ای طولانی در این‌گونه مسائل دارند (میرحسنی، ۲۰۰۶). بروک و پترویک[۲۶] (۲۰۰۲) ، یک تقسیم‌بندی دقیق از رویکردهای موجود در حل مسائل جدول زمان‌بندی ارائه کرده‌اند که شامل موارد زیر است:

۱) رویکرد ترتیبی: در این رویکرد، ابتدا وقایع به‌کمک دامنه‌های اکتشافی موجود مرتب می‌شوند. سپس این وقایع در بازه‌های زمانی قرار داده می‌شوند. این تخصیص و قرارگیری به‌گونه‌ای است که تداخلی پیش نیاید (کارتر،[۲۷] ۱۹۸۶). برای حل مسائل زمان‌بندی با این رویکرد از روش رنگ‌آمیزی گراف استفاده می‌شود. در این رویکرد گره‌ها نمایانگر ساعات درسی و یال‌ها نشان‌دهندهٔ تداخل میان این ساعات هستند. درنهایت گراف باید به‌گونه‌ای رنگ‌آمیزی شود که هیچ دو گره مجاوری، رنگ یکسان نداشته باشند. این رویکرد بازده زمانی خوبی ندارد (زیربان،[۲۸] ۲۰۰۷).

۲) رویکرد خوشه‌بندی: این رویکرد در حل مسائل جدول زمان‌بندی به این صورت است که رویدادها را به گروه‌هایی تقسیم می‌شوند که در ابتدا محدودیت‌های سخت را ارضا کنند و سپس گروه‌ها با ارضای محدودیت‌های نرم به بازه‌های زمانی تخصیص می‌یابند. پیداکردن راه‌حل به‌کمک این رویکرد سریع است؛ اما در بعضی مواقع ممکن است به‌دلیل وابستگی‌های زیاد میان رویدادهای جدول زمان‌بندی، نتایج ضعیفی را حاصل کند.

۳) رویکرد ابتکاری و فراابتکاری: طیف گسترده‌ای از این رویکردها، به‌صورت رویکردهای ترکیبی کاربرد دارند. این رویکردها با یک سری راه‌حل ابتدایی آغاز می‌شوند و سپس با به‌کارگیری استراتژی‌های جستجو سعی در پیداکردن راه‌حل نهایی دارند. تمامی این الگوریتم‌های جستجو می‌توانند جواب‌هایی با کارایی بالا ایجاد کنند؛ اما معمولاً ازلحاظ محاسباتی به صرفه نیستند (بروک و پترویک، ۲۰۰۲).

٤) رویکرد مبتنی بر محدودیت: این رویکرد، یک سیستم مبتنی بر محاسبات است که در آن یک محدودیت می‌تواند روی فضای متغیرها تعریف شود. هدف این رویکرد یافتن مقادیر سازگار و مناسب برای متغیرها است به‌طوری که این مقادیر محدودیت‌ها را ارضا کنند و در دامنهٔ متغیرها باشند. در مجموع، مزیت اصلی مدل‌های برنامه‌ریزی محدودیت نسبت به مدلسازی ریاضی، محدوده‌ای از محدودیت‌هایی است که می‌تواند مستقیماً بیان شود (لئونگ،[۲۹] ۲۰۰٤).

۳-۳- برنامه‌ریزی محدودیت

اولین ایده‌های شکل‌گیری برنامه‌ریزی محدودیت، از هوش مصنوعی نشأت می‌گیرد و مربوط به دههٔ شصت از قرن بیستم است. مزیت اصلی برنامه‌ریزی

Archive of SID

www.SID.ir

محدودیت، جداسازی مدل‌سازی از جستجو برای راه‌حل است که به کاربر کمک می‌کند، تعریف شفاف‌تری از محدودیت‌های یک مسئلهٔ خاص بیان کند. یکی از متخصصان مشهور بین‌المللی به‌نام فرویدر[۳۰] بیان می‌کند که برنامه‌ریزی محدودیت یکی از نزدیک‌ترین مفاهیم در علوم کامپیوتر است که یک هدف عالی را برای برنامه‌نویسی دنبال می‌کند و آن هم این است که کاربر مسئله را بیان کند و کامپیوتر آن را حل کند (میلانو و والاس[۳۱]، ۲۰۰٦)؛ به بیان دیگر، پژوهشگران برنامه‌ریزی محدودیت، الگوریتم‌ها را از سایر رشته‌ها می‌گیرند و آنها را با روش‌های جدید ترکیب می‌کنند و از الگوریتم‌های پیچیده استفاده می‌کنند و هدف اصلی آنها ساخت سیستمی است که هر نوع مدل دقیق سطح بالا از مسئله را بگیرد و به‌صورت اتوماتیک مدل را به‌روش‌های حل کارا تبدیل کند (چن و همکاران[۳۲]، ۲۰۱۰).

برمبنای پژوهش ون‌هنتکریک و سراسوت[۳۳](۱۹۹۷)، پایه و اساس برنامه‌ریزی محدودیت در دو سطح قرار دارد:

۱) سطح اول آنهایی هستند که تعریف کلی از سیستم‌های محدودیتی ارائه می‌دهند.

۲) دومین سطح زبان برنامه‌نویسی است که به کاربر اجازه می‌دهد که اطلاعات بیشتری را دربارهٔ اینکه کدام محدودیت‌ها باید تولید شوند و چگونه باید ترکیب و پردازش شوند مشخص می‌کنند. این زبان‌ها صرفاً ازطریق عملیات ابتدایی با سطح اول در تعامل هستند و یک چارچوب کاملاً مشخصی برای ایجاد، دستکاری و تست محدودیت‌ها ایجاد کرده و ویژگی‌های اعلانی آنها را حفظ می‌کند.

به‌طور کلی می‌توان گفت برنامه‌ریزی محدودیت از سه مرحله به پاسخ می‌رسد:

۱) مدل‌سازی: فرموله‌سازی مسئله به‌صورت مجموعهٔ محدودی از محدودیت‌ها یا مسئلهٔ ارضای محدودیت است؛

۲) حل: حل مسئله ارضای محدودیت با زبان‌های برنامه‌نویسی محدودیت است؛

۳) نگاشت: نگاشت راه‌حل به‌دست‌آمده برای مسئلهٔ ارضای محدودیت به یک راه‌حل برای مسئلهٔ اصلی است؛

در ادامه مسائل ارضای محدودیت برای درک بهتر راه‌حل برنامه‌ریزی محدودیت شرح داده می‌شود.

۳-۳-۱- مسائل ارضای محدودیت

بخش وسیعی از مسائل در حوزهٔ هوش مصنوعی، مربوط به مسائل ارضای محدودیت است. مسائل ارضای محدودیت چارچوبی واحد برای مطالعهٔ مسائل مختلف محاسباتی ارائه می‌کنند. مؤلفه‌های اصلی مسائل ارضای محدودیت، متغیرها و محدودیت‌ها هستند. هدف اصلی در حل این‌گونه مسائل، مقداردهی متغیرها است؛ به‌گونه‌ای که همهٔ محدودیت‌های تعریف‌شده در مسئله ارضا شوند. مقداردهی متغیرها با استفاده از دامنهٔ تعریف‌شده روی آن متغیر صورت می‌گیرد؛ همچنین هنگام مقداردهی متغیرها باید توجه داشت که مقادیر همهٔ متغیرها باید با هم سازگار باشند (ثانی و نمازی، ۱۳۸۳).

یک مسئلهٔ ارضای محدودیت به‌صورت یک ۳تایی $CSP = (X, D, C)$ تعریف می‌شود که X، یک مجموعهٔ متناهی از متغیرها است و به‌صورت $X = \{x_1, x_2, ..x_n\}$ است و D یک مجموعهٔ متناهی از مقادیر دامنه است و به‌صورت $D = d_1 \times d_2 ... \times d_n$

Archive of SID

www.SID.ir

خواهد بود. همچنین C مجموعهٔ متناهی از محدودیت‌ها است و $C=\{c_1,c_2,...,c_m\}$ است .

۳-۳-۲- الگوریتم‌های جستجو

حل مسائل ارضای محدودیت در هوش مصنوعی با کمک جستجو انجام می‌گیرد. فضای جستجوی این مسائل شامل وضعیت‌هایی است که در آنها مقدار تعدادی از متغیرهای موجود در مسئله تعیین شده است. منظور از وضعیت اولیه در این مسائل، تنها تعریف مسئله بدون مقداردهی به متغیرها است و نیز در وضعیت یا وضعیت‌های هدف مقدار کلیهٔ متغیرها با رعایت کلیهٔ محدودیت‌ها تعیین می‌شود (ثانی و نمازی، ۱۳۸۳).

الگوریتم‌های حل مسائل ارضای محدودیت می‌توانند کامل یا ناکامل باشند. یک الگوریتم کامل یافتن جواب در صورت وجود را تضمین می‌کند و همچنین می‌تواند برای اثبات نبودِ جواب و یا یافتن یک جواب بهینهٔ اثبات‌شده برای یک مسئلهٔ ارضای محدودیت، به کار گرفته شود (لئونگ، ۲۰۰٤).

یک مسئلهٔ ارضای محدودیت را می‌توان با استفاده از الگوی تولید-آزمایش (GT) حل کرد، در این پارادایم، هر ترکیب ممکنی از متغیرها به‌صورت سیستماتیک تولید شده و سپس آزمایش می‌شود که آیا همهٔ محدودیت‌ها را ارضا می‌کند یا خیر. اولین ترکیبی که همهٔ محدودیت‌ها را ارضا می‌کند، یک راه‌حل است. تعداد ترکیباتی که با این روش در نظر گرفته می‌شود برابر با ضرب دکارتی دامنهٔ همهٔ متغیرها است. یک روش کاراتر برای حل یک مسئلهٔ ارضای محدودیت، الگوی عقب‌گرد (BT) است. در این روش متغیرها به‌ترتیب مقداردهی می‌شوند و وقتی که متغیرهای مربوط به یک محدودیت مقداردهی شدند، اعتبار محدودیت بررسی می‌شود. اگر مقداردهی جزئی انجام‌شده، هرکدام از محدودیت‌ها را نقض کند، یک عقب‌گرد به سمت آخرین متغیر که مقداردهی شده است و هنوز یک یا تعداد بیشتری مقدار برای جایگزینی دارد، انجام می‌شود. روش عقب‌گرد از جستجوی عمق‌اول[۳۶] فضای راه‌حل‌های بالقوهٔ یک مسئلهٔ ارضای محدودیت استفاده می‌کند (لئونگ، ۲۰۰٤). در این جستجو تمام فضای حالت بررسی می‌شود تا به جواب بهینه برسد. در جستجوی عمق اول ابتدا ریشهٔ درخت و سپس همهٔ فرزندانش ملاقات می‌شوند که عموماً فرزندان یک گره از چپ به راست ملاقات می‌شوند. در جستجو در عمق، یک مسیر آنقدر در عمق پیش می‌رود تا به بن‌بست برسد. در بن‌بست، دوباره آنقدر به عقب بر می‌گردد تا به یک گره با یک فرزند ملاقات‌نشده برسد. سپس، از این فرزند ملاقات‌نشده، پیشروی در عمق را مجدداً تا رسیدن به بن‌بست دیگر ادامه می‌دهد. روش عمق اول که به‌عنوان روش جستجوی این پژوهش انتخاب شده است، در ردهٔ الگوریتم‌های کامل قرار می‌گیرد و یک جواب بهینهٔ اثبات‌شده می‌دهد (لئونگ، ۲۰۰٤).

٤- مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی ۳ گام دارد که در ادامه به تفصیل آمده‌اند.

گام اول: قبل از فرموله‌سازی مسئله، نخست لازم است مفروضات اولیه و همچنین محدودیت‌های سخت و نرم مسئله که متناسب با نمونهٔ موردمطالعه از تنوع بالایی برخوردار هستند، شناسایی شوند. مفروضات اولیه شامل تعداد استادان، رشته‌های تحصیلی و ورودی‌های موجود، تعداد اتاق‌های موجود، روزهای کاری در هفته، بازه‌های زمانی و اوقات کاری صبح و عصر است. واژگان کاربردی استفاده‌شده در این پژوهش که شناسهٔ فرضیات

Archive of SID

www.SID.ir

هستند، در جدول ۱ آمده است. شناسایی این مفروضات و محدودیت‌ها از روش‌های گوناگون نظیر بررسی داده‌های گذشته، و مصاحبه با مسئولان برنامه‌ریزی، امکان‌پذیر است.

گام دوم: در این گام، مدل به‌صورت یک مسئلهٔ ارضای محدودیت تعریف می‌شود؛ به این منظور لازم است متغیرهای تصمیم‌گیری و دامنه‌های مربوط به هرکدام، معیّن شوند. در مدل پیشنهادی از دو نوع متغیر تصمیم‌گیری استفاده می‌شود: ۱) متغیرهای تصمیم‌گیری اصلی که عبارت از زمان شروع هر درس، استاد آن درس و اتاق تخصیص‌یافته به آن درس هستند؛ و ۲) متغیرهای تصمیم‌گیری کمکی که شامل زمان پایان هر درس و متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به تخطی از محدودیت‌های نرم هستند.

گام سوم: درنهایت در گام پایانی، مسئله به‌صورت یک مسئلهٔ ارضای محدودیت فرموله‌سازی شده و محدودیت‌های سخت و نرم با توجه به متغیرهای تصمیم‌گیری اصلی و فرعی بیان می شوند.

٤-۱- محدودیت‌ها

در گام نخست، اطلاعات به‌دست‌آمده به‌دلیل تنوع انتظارات و محدودیت‌های دانشگاه‌های مختلف، خروجی‌های متفاوتی به‌همراه دارد؛ بنابراین آنچه که در ادامه ملاحظه می‌شود، محدودیت‌های استخراج‌شده از مطالعهٔ موردی این پژوهش است. محدودیت‌های سخت و نرم مسئله ازطریق بررسی داده‌های گذشته و مصاحبه با مسئولان مربوطه شناسایی شد که در ادامه به‌تفکیک بیان می‌شوند.

گفتنی است که محدودیت‌های سخت در میان تمام جدول‌های زمان‌بندی دروس دانشگاهی مشترک است؛ ولی محدودیت‌های نرم بسته به مطالعهٔ کاربردی موردنظر، طیفی از محدودیت‌های متنوعی را در بر می‌گیرد.

جدول (۱): واژگان کاربردی تعریف مسئلهٔ جدول زمان‌بندی

گروه آموزشی: موجودیتی است که با سه خصیصهٔ مقطع، نام رشته و سال ورود مشخص می‌شود؛ برای مثال کارشناسی بازرگانی ۹۱ مربوط به دانشجویان کارشناسی رشته بازرگانی ورودی سال ۱۳۹۱ است.
جلسه: تعداد جلسات یک درس، متناسب با تعداد واحدهای تعریف‌شده برای آن، بیان می‌شود. دروس ۱ و ۲ واحدی در یک جلسه در هفته برگزار می‌شوند و برای دروس سه واحدی دو جلسه در هفته تعریف می‌شود.
واحد درسی: هر درس از تعدادی واحد تشکیل شده که تعداد جلسات هر درس را نیز مشخص می‌کند.
استاد: شخصی که تدریس درسی را بر عهده دارد. استاد می‌تواند عضو هیئت علمی گروه موردمطالعه باشد و یا از گروه‌های درسی دیگر موجود در دانشگاه برای تدریس درسی خاص، معرفی شده باشند. به هر استاد مجموعه‌ای از دروس که در تخصص وی است، تخصیص داده می‌شود.
دروس سرویسی: دروسی که توسط گروه‌های آموزشی دیگر برای دانشجویان گروه آموزشی موردمطالعه، ارائه می‌شود.
روزهای کاری: روزهایی که دانشجویان به تحصیل می‌پردازند.
بازهٔ زمانی: یک بازهٔ زمانی معرف یک ساعت کاری مشخصی از یک روز معین است.
بازه‌های زمانی متداخل: دو بازهٔ زمانی برای دو درس متفاوت، هنگامی تداخل پیدا می‌کنند که ساعت شروع یکسانی داشته باشند.

Archive of SID

www.SID.ir

٤-١-١- محدودیت‌های سخت

محدودیت‌های سخت این مسئله به شرح زیر هستند:

- برگزارنشدن دروس در غیر روز کاری؛
- محدودیت تعداد اتاق‌ها؛
- اختصاص‌ندادن بیش از یک درس به‌طور هم‌زمان به هر استاد؛
- برگزارنشدن دو درس متفاوت در یک اتاق در هر زمان؛
- تداخل‌نداشتن زمان دروس یک رشتهٔ خاص؛
- یکسان‌بودن جلسات مختلف یک درس برای یک ورودی خاص؛
- دروس سرویسی تنها در ساعات مشخص‌شده ارائه شوند؛
- برگزاری دروس در اتاق با ظرفیت مناسب؛
- جلسات یک درس خاص، در یک روز برگزار نشوند؛
- درنظرگرفتن کمینه ساعات تدریسی استادان در طول هفته؛
- جلسات دوساعتی در ساعات زوج اوقات کاری هر روز شروع شوند. منظور از ساعات زوج، ساعات ۸، ۱۰، ١٤ و ١٦ یک روز کاری است؛
- دروس در ساعات حضورنداشتن استادان برگزار نشوند.

٤-١-٢- محدودیت‌های نرم

محدودیت‌های نرم این مسئله به دو دستهٔ محدودیت‌های نرم سطح یک و دو دسته‌بندی می‌شوند. محدودیت‌های نرم سطح یک، شامل محدودیت‌های آموزشی و محدودیت‌های نرم سطح دو شامل انتظارات استادان و دانشجویان است. این دو دسته محدودیت به شرح زیر هستند:

الف) محدودیت‌های آموزشی:

- اتاق بتواند امکانات خاص یک درس را پشتیبانی کند؛
- بیشینه ساعات تدریسی استادان در طول هفته در نظر گرفته شود؛
- روزهای تشکیل دروس دانشجویان ارشد و دکتری متوالی باشند؛
- فاصلهٔ (شکاف) میان دروس یک ورودی در یک روز کاری، کم باشد.

ب) انتظارات:

- تا جایی که امکان‌پذیر است، ساعات ترجیحی استادان برای برگزاری دروس در نظر گرفته شوند؛
- درنظرگرفتن دانشجو(یان) در یک ورودی خاص که به‌دلیل مشکلات فیزیکی ترجیح می‌دهند دروس آنها در طبقهٔ اول باشد.

٤-٢- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی

در این گام، متغیرهای تصمیم‌گیری تعیین شده و محدودیت‌های سخت و نرم براساس این متغیرها تعریف می‌شوند. پارامترهای تعریف در جدول ۲ آمده‌اند. مدل پیشنهادی شامل مجموعهٔ برنامه درسی $P=\{p_1, p_2,..., p_n\}$ است. برای دروس با تعداد واحد بیشتر از ۲ که نیاز به برگزاری بیش از دو جلسه در هفته دارند، دو موجودیت با ID یکسان تعریف می‌شود. از آن‌جایی که یک مسئلهٔ ارضای محدودیت با متغیرهای تصمیم‌گیری به‌همراه مقادیر دامنهٔ آنها و همچنین محدودیت‌های اعمال‌شده بر آنها تعریف می‌شود، می‌توان مسئلهٔ جدول زمان‌بندی دروس

Archive of SID

www.SID.ir

دانشگاهی را به مسئلهٔ ارضای محدودیت تبدیل کرد. این فرایند به‌ترتیب از تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری آغاز می شود و به بیان تمامی محدودیت‌های موجود می‌پردازد. درنهایت هدف مدل، ارضای کامل محدودیت‌های سخت و حداقل‌سازی میزان تخطی از محدودیت‌های نرم است.

٤-۲-۱- متغیرهای تصمیم‌گیری

متغیرهای تصمیم‌گیری جهت پیاده‌سازی این مسئله به دو دستهٔ متغیرهای اصلی و کمکی تقسیم می‌شوند. متغیرهای اصلی و دامنهٔ مقادیر آنها که بر روی اعضای مجموعهٔ p تعریف می‌شوند، به شرح زیر هستند:

$sr_{p_i} \in TS$: زمان شروع موجودیت p_i است که دامنه آن شامل مقادیر مجموعه TS است.

$r_{p_i} \in R$: اتاق تخصیص‌یافته به موجودیت p_i است که دامنهٔ آن شامل مقادیر مجموعهٔ R است.

$t_{p_i} \in T$: استاد تخصیص‌یافته به موجودیت p_i است که دامنهٔ آن شامل مقادیر مجموعهٔ T است.

متغیرهای کمکی نیز به شرح زیر هستند:

$e_{p_i} \in TS$: زمان پایان موجودیت p_i است که دامنه آن شامل مقادیر مجموعهٔ TS است.

$pen_{ct_k p_i}$: جریمهٔ تخصیص‌یافته به موجودیت p_i که به‌دلیل نقض محدودیت نرم ct_k اتفاق می‌افتد.

٤-۲-۲- پیاده‌سازی محدودیت‌ها

غالباً در محدودیت‌ها از عبارات منطقی استفاده شده است. این عبارات به‌خصوص در محدودیت‌های نرم، سبب بهبود خوانایی برنامه‌نویسی مدل و ارتقای کارایی اجراگرفتن از آن شده است. منظور از یک فرمان منطقی این است که یک عبارت در صورت صحیح‌بودن، مقدار ۱ و در صورت اشتباه‌بودن، مقدار صفر را به خود می‌گیرد؛ برای مثال عبارت فرمان منطقی $(sr_j \geq sr_i)$ به‌صورت زیر توصیف می‌شود:

$$(sr_j \geq sr_i)\begin{cases}1 & if \quad True\\ 0 & if \quad False\end{cases}$$

٤-۲-۲-۱- پیاده‌سازی محدودیت‌های سخت

به‌دلیل تعریف مناسب دامنهٔ متغیرهای تصمیم‌گیری، دروس تنها در ساعات کاری و همچنین روزهای کاری هفته تشکیل می‌شود. همچنین تشکیل این دروس نیز در اتاق‌های موجود صورت می‌پذیرد. در نتیجه این سه محدودیت سخت ذاتاً ارضا می‌شوند.

سایر محدودیت‌های سخت مسئله با درنظرگرفتن متغیرهای تصمیم‌گیری به شرح زیر هستند:

– درس پس از شروع در طی زمان تخصیص‌یافته به آن پایان یابد. در این محدودیت متغیر کمکی $e_{p_i} \rightarrow TS$ محاسبه می‌شود؛

$$e_{p_i} = p_i.d + sr_{p_i}, \quad \forall p_i \in P \qquad (۱)$$

– استاد باید بتواند درس را تدریس کند (درس در تخصص وی باشد).

$$t_{p_i} \in PT_{p_i.c}, \quad \forall p_i \in p \qquad (۲)$$

– استاد نمی‌تواند در یک زمان خاص بیش از یک درس را تدریس کند.

$$\sum_{p_j \in P}((sr_{p_j} \geq sr_{p_i})(sr_{p_j} \leq e_{p_i})(t_{p_i} == t)) \leq 1, \qquad (۳)$$
$$\forall (p_i \in P, t \in T) | p_i.c \in Sp_t$$

– در یک اتاق خاص، هم‌زمان بیش از یک درس، تدریس نشود؛

$$\sum_{p_j \in P}((sr_{p_j} \geq e_{p_i})(sr_{p_j} \leq e_{p_i})(r_{p_i} == nr)) \leq 1, \qquad (٤)$$
$$\forall (p_i \in P, < nr, f, cap > \in R)$$

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۲): پارامترهای مسئله

$P=\{p_1, p_2,..., p_n\}$: مجموعهٔ موجودیت‌های برنامه است که هر عضو، یک چندتایی $p_i=\{<g,c,d,ID>\}$ را شامل می‌شود. g معرف رشته، c معرف درس، d معرف طول زمان جلسه و ID شماره درس است.

i: شناسهٔ برنامهٔ iام.

c_i: شناسهٔ درس c از برنامهٔ p_i ام.

d_{c_i}: مدت‌زمان جلسهٔ درس c از برنامهٔ p_i ام.

t_{c_i}: استاد اختصاص‌یافته به درس c از برنامهٔ p_i ام.

$T=\{t_1,...,t_{|T|}\}$: مجموعهٔ استادان.

$E=\{e_1,...,e_{|E|}\}$: مجموعهٔ ورودی‌های مختلف که هر موجودیت $e=\{<n,pu>\}$ شامل چندتایی است که ne نام ورودی و pu تعداد دانشجویان آن ورودی است.

$MS=\{ms_1,...,ms_{|MS|}\}$: مجموعهٔ موجودیت ورودی‌های کارشناسی.

$BS=\{bs_1,...,bs_{|BS|}\}$: مجموعهٔ ورودی‌های کارشناسی ارشد و دکترا.

$C=\{c_1,...,c_{|C|}\}$: مجموعهٔ دروس.

$TS=\{0,...,ts\}$: مجموعهٔ بازه‌های زمانی.

$OT\subset TS$: مجموعهٔ بازه‌های زمانی که با ساعات زوج آغاز می‌شوند.

$CT=\{ct_1,...,ct_{|CT|}\}$: مجموعهٔ محدودیت‌های نرم.

$SP_{t\in T}=\{c_1,...,c_{|Speciality_{t\in T}|}\}$: مجموعهٔ دروسی که استاد t قادر به تدریس آنهاست.

$PT_{c\in C}=\{t_1,...,t_{|pt_{c\in C}|}\}$: مجموعهٔ استاد که قادر به تدریس درس c هستند.

$R=\{r_1,...,r_{|R|}\}$: مجموعهٔ موجودیت اتاق‌های دردسترس است که هر موجودیت چندتایی $r=\{<nr,f,cap>\}$ را شامل می‌شود. nr نام اتاق و f طبقه‌ای است که اتاق در آن قرار دارد. ظرفیت کلاس نیز با cap مشخص می‌شود.

$SR_{c\in C}=\{r_1,...,r_{|sr_{c\in C}|}\}$: مجموعهٔ اتاق‌هایی که می‌توانند امکانات موردنیاز درس c را برآورده سازند.

$SCs=\{sc_1,...,sc_{|SC|}\}$: مجموعهٔ موجودیت‌های دروس سرویسی است که هر موجودیت چندتایی $sc=\{<c,sr>\}$ را شامل می‌شود. c نام درس و sr زمان شروع تخصیص‌یافته به آن درس است.

Mday: تعداد بازه‌های زمانی صبح

Eday: تعداد بازه‌های زمانی عصر

EM: کل بازه‌های زمانی یک روز

$Ah=\{ah_1,...,ah_{|Ah|}\}$: مجموعهٔ موجودیت‌های ساعات حضورنداشتن استادان است که هر موجودیت شامل چندتایی $ah=\{<t,as>\}$ است. as بازه‌های زمانی حضورنداشتن استادان است.

$Ph=\{ph_1,...,ph_{|Ph|}\}$: مجموعهٔ موجودیت‌های ساعات ترجیحی استادان است که هر موجودیت $ph=\{<t,ps>\}$ است. ps بازه‌های زمانی ترجیحی استادان است.

$Trep=\{tr_1,...,tr_{|Tre|}\}$: مجموعهٔ موجودیت‌های سابقهٔ استادان است که هر موجودیت $tr=\{<t,rep>\}$ است. rep سابقهٔ استادان است.

$MAH=\{xt_1,...,xt_{|MH|}\}$: مجموعهٔ موجودیت‌های حداکثر ساعات تدریس استادان در هفته است که هر موجودیت شامل چندتایی $xt=\{<t,ma>\}$ است. ma بیشینه ساعت کاری استادان در هفته است.

$MIH=\{mt_1,...,mt_{|MIH|}\}$: مجموعهٔ موجودیت‌های حداقل ساعات تدریس استادان در هفته است که هر موجودیت شامل چندتایی $mt=\{<t,mi>\}$ است. mi کمینه ساعت کاری استادان در هفته است.

co_{ct_k}: ضریب تخطی تعریف‌شده برای محدودیت نرم ct_k.

Archive of SID

www.SID.ir

– دروس مربوط به یک رشتهٔ خاص، ازنظر زمانی تداخل نداشته باشند؛ به معنی دیگر، در یک زمان خاص، برای دانشجویان یک رشته، بیش از یک درس تشکیل نشود.

$$\sum_{p_j \in P}((sr_{p_j} \geq sr_{p_i})(sr_{p_j} \leq sr_{p_i}) == 1) \leq 1, \quad \forall(p_i \in P, < ne, pu > \in E) | p_i.g == ne \qquad (۵)$$

– جلسات مختلف یک درس یکسان برای یک رشتهٔ خاص، توسط یک استاد یکسان تدریس شود.

$$t_{p_i} = t_{p_j}, \quad \forall(p_i, p_j \in P) | (i \neq j. p_i.ID = p_j.ID). \qquad (٦)$$

– دروس سرویسی تنها در ساعات مشخص‌شده، برگزار شوند.

$$sr_{p_i} = sr, \quad \forall(p_i \in P, < ne, pu > \in E, < c, sr > \in SC) | \; | p_i.c == c. \qquad (۷)$$

– ظرفیت اتاق مناسب با تعداد دانشجویان حضوریافته در آن باشد.

$$if\ (p > c) then (room_{p_i} != r), \quad \forall(p_i \in P, < ne, pu > \in E, < nr, f, cap > \in R | \; p_i.g == e. \qquad (۸)$$

– جلسات یک درس یکسان از یک رشتهٔ خاص، در یک روز برگزار نشوند.

$$(\lfloor sr_{p_i} / (Eday + Mday) \rfloor) \neq (\lfloor sr_{p_j} / (Eday + Mday) \rfloor), \quad \forall(p_i, p_j \in P) | (p_i.ID == p_j.ID, p_i.g == p_j.g) \qquad (۹)$$

– ساعات کاری استادان کمتر از حداقل ساعات تعیین‌شده نباشد.

$$\sum_{p_i \notin P} p_i.d \geq mt, \quad \forall(p_i \in P, < t, mi > \in MIH) | \; p_i.c \in Sp_t. \qquad (۱۰)$$

– جلسات دو واحدی در اوقات کاری زوج شروع شوند.

$$sr_{p_i} \notin OT, \quad \forall(p_i \in P) | \; p_i.d > 1 \qquad (۱۱)$$

– دروس در ساعات حضورنداشتن استادان برگزار نشوند.

$$sr_{p_i} \neq as, \quad \forall(p_i \in P, t \in T, < tr, as > \in Ah) | \; (t = tr), (c \in Sp_t). \qquad (۱۲)$$

٤-۲-۲-۲- پیاده‌سازی محدودیت‌های نرم

محدودیت‌های نرم مسئله به دو دستهٔ محدودیت‌های آموزشی و انتظارات تقسیم می‌شوند. این محدودیت‌ها با درنظرگرفتن متغیرهای تصمیم‌گیری به شرح زیر هستند.

الف) محدودیت‌های آموزشی:

– اتاق بتواند امکانات خاص یک درس را پشتیبانی کند.

$$pen_{ct_1} = (r_{p_i} \notin SR_{p_i.c}) \times \cos t_{ct_1}, \forall(p_i \in P) \qquad (۱۳)$$

– ساعات کاری استادان از بیشینه تعیین شده تجاوز نکند.

$$pen_{ct_2 t} = (\sum_{p_i \in P} p_i.d > ma) \times \cos t_{ct_2}, \quad \forall(p_i \in P, < t, ma > \in MAH) | (p_i.c = Sp_t) \qquad (۱٤)$$

– بین روزهای تشکیل دروس دانشجویان ارشد و دکترا فاصله‌ای نباشد. (ترجیحاً در ۲ یا ۳ روز برگزار شوند.)

(۱۵)

$$pen_{ct_3 b} = (\sum_{p_i, p_j \in P} (\lfloor sr_{p_i} / EM \rfloor - \lfloor sr_{p_j} / EM \rfloor) > 2) \times \cos t_{ct_3}, \quad \forall(bs \in BS) | (p_i.g = bs, p_j.g = bs)$$

فاصلهٔ (شکاف) میان دروس یک ورودی در یک روز کاری کاهش پیدا کند. در این محدودیت فاصله زمان

Archive of SID

www.SID.ir

شروع یک درس از خاتمهٔ درس قبلی مربوط به یک ورودی یکسان، باید کمتر از ۳ واحد زمانی باشد.

(۱۶)

$$if\ \lfloor sr_{p_i}/EM \rfloor = \lfloor sr_{p_j}/EM \rfloor$$
$$then$$
$$pen_{ct_4 e} = (\sum_{p_i, p_j \in P} (|sr_{p_i} - e_{p_j}| > 3)) \times \cos t_{ct4},$$
$$\forall (p_i, p_j \in P, < ne, pu > \in E |$$
$$(p_i.ID \neq p_j.ID, p_i.g = ne, p_j.g = ne)$$

ب) انتظارات:

- تا جایی که امکان‌پذیر است، ساعات ترجیحی استادان برای برگزاری دروس در نظر گرفته شوند.

$$pen_{ct_5 t} = (\sum_{p_i \in P} sr_{p_i} \neq ps) \times \cos t_{ct_5} \times rep, \quad (۱۷)$$
$$\forall (< t, ps > \in Ph), (< tr, rep > \in Trep) | t = tr:$$

در این محدودیت ضریب سابقهٔ استادان نیز در نظر گرفته می‌شود. یعنی راه‌حل مسئله به‌گونه‌ای است که ساعات ترجیحی استادان باسابقه در اولویت این محدودیت قرار گرفته است.

- درنظرگرفتن دانشجو(یان) در یک ورودی خاص که به‌دلیل مشکلات فیزیکی ترجیح می‌دهند دروس آنها در طبقهٔ اول باشد.

$$pen_{ct_6 e} = (\sum_{p_i \in P} r_i \notin R) \times \cos t_{ct_6},$$
$$\forall (p_i \in P, < nr, f, cap > \in R, < ne, pu > \in E) | \quad (۱۸)$$
$$(p_i.g = ne, f = 1)$$

در مدل پیشنهادی، هدف ارضای کامل محدودیت‌های سخت و همچنین ارضای حداکثری محدودیت‌های نرم است؛ بنابراین تابع هدفی به‌منظور حداقل‌کردن جریمه‌های اختصاص‌یافته به تخطی از محدودیت‌های نرم، تعریف می‌شود.

$$pen_{ct_2} = \sum_{t \in T} pen_{ct_2 p_t} \quad (۱۹)$$

$$pen_{ct_3} = \sum_{bs \in BS} pen_{ct_3 p_b} \quad (۲۰)$$

$$pen_{ct_4} = \sum_{e \in E} pen_{ct_4 p_e} \quad (۲۱)$$

$$pen_{ct_5} = \sum_{t \in T} pen_{ct_5 p_t} \quad (۲۲)$$

$$pen_{ct_6} = \sum_{e \in E} pen_{ct_6 p_e} \quad (۲۳)$$

$$OF: Minimize \sum_{ct_k \in CT} pen_{ct_k} * w_{ct_k} \quad (۲۴)$$

w_{ct_k} ضرایب تابع هدف هستند. این ضرایب به‌مفهوم اهمیت یک محدودیت است. این ضرایب در مطالعهٔ موردی ازطریق مقایسه‌های زوجی و استفاده از تکنیک AHP به دست می‌آید. مقایسه‌های زوجی براساس نظر کارشناسان است.

۵- مطالعهٔ موردی

در این بخش، مدل پیشنهادی برای ایجاد جدول زمان‌بندی گروه مدیریت دانشگاه اصفهان در ترم نخست سال تحصیلی ۹۴-۱۳۹۳ پیاده‌سازی می‌شود. در این گروه در ترم نخست سال تحصیلی ۹۴-۱۳۹۳ تعداد ۲۴ عضو هیئت علمی مشغول به تدریس هستند. روزهای کاری دانشگاه اصفهان از شنبه تا چهارشنبه است. تعداد ساعات کاری یک روز در دانشگاه اصفهان نیز ۹ ساعت است. درنتیجه تعداد کل بازه‌های زمانی ۹×۵ است. در مدل پیشنهادی بازه‌های زمانی مجموعهٔ $T=\{۱،۲...،۴۵\}$ را تشکیل می‌دهد؛ مثلاً بازهٔ زمانی ۱۲، نمایانگر ساعت ۱۱ تا ۱۲ روز یک‌شنبه است. اوقات کاری صبح دربرگیرندهٔ بازه‌های زمانی موجود در بین ساعت ۸ صبح تا ۱۲ ظهر (شامل ۴ بازهٔ زمانی) است و اوقات کاری عصر دربرگیرندهٔ بازه‌های زمانی موجود در بین ساعت ۱۳ بعدازظهر تا ۱۸ عصر (شامل ۵ بازهٔ زمانی) است. مجموع کل

Archive of SID

www.SID.ir

دروس تدریسی در سه مقطع این گروه برابر ۱٤٦ است که در ۳٦ اتاق تدریس می‌شوند. دانشجویان این دانشکده در سه مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا و در مجموع در ۳۱ گروه آموزشی مشغول به تحصیل هستند. ساختمان مجموعهٔ کلاس‌هایی که اتاق‌ها در آن استقرار دارند، شامل ۲ طبقه است. سایر اطلاعات موردنیاز برای حل مسئله که شامل سابقهٔ استادان، ساعات ترجیحی و حضورنداشتن آنها، بیشینه و کمینهٔ کاری آنها در طول یک هفتهٔ کاری و دروس سرویسی هستند، ازطریق مصاحبه با مسئولین برنامه‌ریزی گروه مدیریت دانشگاه اصفهان، به دست آمد. سپس با تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری و شناسایی محدودیت‌ها مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی محدودیت تعریف شد. مدل به‌دست‌آمده در نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX و با زبان برنامه‌نویسی OPL پیاده‌سازی شد.

٦- ارزیابی نتایج

مسئلهٔ جدول زمان‌بندی دروس دانشگاهی در گروه مدیریت دانشگاه اصفهان، با داده‌های اصلی و درنظرگرفتن تمام محدودیت‌ها، با ۱۱۰۰ متغیر تصمیم‌گیری و تعداد ۲،۸۳۸،۱۸۸ محدودیت در مدت‌زمان ۱۳۱۵ ثانیه حل شد. الگوریتم جستجوی مورداستفاده در این پژوهش، الگوریتم جستجوی عمق اول و راه‌اندازی مجدد است.

در جدول ۳ تأثیر اضافه‌کردن محدودیت‌های نرم به مسئله، در زمان حل و همچنین تعداد موجودیت‌هایی که به آنها جریمه تخصیص داده شده آمده است. ستون نخست شامل نام محدودیت نرم جدید اضافه‌شده به محدودیت‌های نرم قبل، است و ستون دوم تعداد تخطی از این جریمه‌ها است و درنهایت ستون سوم نیز نمایانگر زمان رسیدن به جواب مسئله است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، برنامهٔ نهایی به‌دست‌آمده با درنظرگرفتن تمام محدودیت‌ها، تنها در ۲ مورد تخطی داشته است. از طرفی اضافه‌کردن محدودیت‌های نرم، زمان حل را افزایش داده‌اند. البته درنهایت زمان کل حل مسئله در مقایسه با وقتی که کارشناسان برنامه‌ریزی برای تهیهٔ برنامهٔ آموزشی صرف می‌کنند، بسیار ناچیز است.

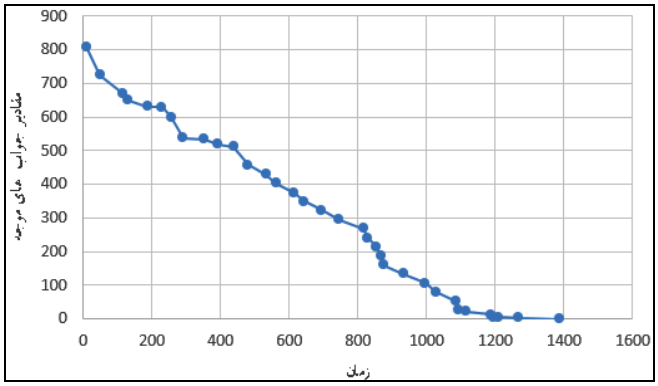
جدول (۳): تأثیر افزودن محدودیت نرم بر جواب و زمان حل مسئله

محدودیت نرم	*تعداد تخطی*	*زمان (ثانیه)*
–	–	۲۲٤/۷
(۱۲)	۰	۳۱۸/٦
(۱۵)	۰	۱۲۳۲/۲
(۱٦)	۰	۱۲٤۰/۷
(۱۸)	۰	۱۲٦۰/٤
تمام محدودیت‌ها	۲	۱۳۱۵

الگوریتم جستجوی مورداستفاده در این پژوهش (عمق اول)، در طی زمان رسیدن به بهترین جواب، راه‌حل‌های موجه مختلفی ارائه می‌دهند. آخرین راه‌حل بهترین جوابی است که توانسته تا حدود بسیار زیادی محدودیت های نرم مسئله را ارضا کند. در نمودار ۱ مراحل رسیدن به یک جواب با حداقل تخطی از تابع هدف را برای جواب نهایی مسئله نمایش داده می‌شود. در فرایند حل، تعداد جواب‌های موجه برابر ۳٤ است که درنهایت با تعداد ۲ واحد تخطی از محدودیت‌های نرم، در ۱۳۱۵ ثانیه به جواب نهایی می‌رسد. این جواب از آنجایی که توسط یک الگوریتم کامل به دست آمده است، یک جواب بهنیه است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. جواب‌های مختلف حل مسئلهٔ نهایی

در جدول ٤ نمونه‌ای از برنامه درسی ترم هفتم گروه مدیریت صنعتی دانشگاه اصفهان در نیم‌سال نخست سال تحصیلی ۹٤-۱۳۹۳ مشاهده می‌شود.

خواسته‌های شناسایی‌شده برای این برنامه به شرح زیر هستند:

- درس دانش خانواده در ساعت ١٦-١٤ روز شنبه تدریس شود؛
- درس مدیریت در ساعت ١٦-١٤ روز چهارشنبه توسط خانم دکتر ص تدریس شود.؛
- دکتر «ق» در کل روز شنبه و همچنین روز سه‌شنبه ساعت ۱۰-۸ صبح کلاس نداشته باشد؛
- دکتر «ع» در ساعت ۱۲-۱۰ دوشنبه کلاس نداشته باشد؛
- کلاس‌های دکتر«ع» ترجیحا در اوقات کاری صبح برگزار شود؛
- دکتر «ش» در روز چهارشنبه و همچنین ساعت ۱۰-۸ روز سه شنبه کلاس نداشته باشد.

در این برنامهٔ درسی، محدویت‌های سخت کاملاً ارضا شده و خواسته‌ها و انتظارات نیز برآورده شده‌اند. علاوه بر رعایت تداخل‌نداشتن زمانی و مکانی، شروع جلسات دو ساعتی در ساعات زوج اتفاق افتاده و دروس سرویسی نیز در ساعات خواسته‌شده قرار گرفته است. از طرفی حداقل شکاف در دروس روزانهٔ دانشجویان ملاحظه شده است. این امر در راستای بهبود شرایط آموزش و استفاده مناسب از وقت دانشجویان، امری ضروری به نظر می‌آید. خواسته‌های استادان نیز در این برنامه کاملاً رعایت شده‌اند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی محدودیت برای حل مسئله جدول زمان‌بندی دروس دانشگاهی به کار گرفته شد. محدودیت‌های شناسایی‌شده برای حل این مسئله نیز به دو دستهٔ محدودیت‌های سخت و نرم تقسیم‌بندی شد. برای حل این مسئله باید توجه داشت که گرچه محدودیت‌های سخت برای اکثر دانشگاه‌ها یکسان است، محدودیت‌های نرم بسته به محیط تعریف‌شده برای انجام پژوهش متفاوت است؛ زیرا انتظارات ذی‌نفعان (شامل استادان، دانشجویان و مسئولین برنامه‌ریزی) در دانشگاه‌های مختلف، متفاوت است. درنتیجه نخستین گام در جهت پیاده‌سازی مدل، شناسایی این محدودیت‌ها است. این محدودیت‌ها و انتظارات در مطالعهٔ موردی، ازطریق

Archive of SID

www.SID.ir

بررسی داده‌های گذشته و همچنین مصاحبهٔ باز با مسئولین برنامه‌ریزی شناسایی شدند.

مهم‌ترین تفاوت این پژوهش با سایر پژوهش‌ها، تمرکز بر محدودیت‌های نرم است. محدودیت‌های سخت که ارضای آنها ضروری است، در جهت موجه‌بودن برنامهٔ به‌دست‌آمده، اعمال می‌شود؛ لکن محدودیت‌های نرم در جهت ارضای حداکثری انتظارات ذی‌نفعان مسئله اعمال می‌شود. راهکار پیشنهادی، تخصیص جریمه به تخطی از محدودیت‌های نرم و حداقل‌سازی این جریمه‌ها است. در مدل‌هایی که از برنامه‌ریزی محدودیت برای حل مسئله استفاده شده است، از محدودیت‌های وزن‌دار استفاده کرده‌اند. درنتیجه به محدودیت و نه موجودیت‌های درون هر محدودیت اولویت داده می‌شود. این رویکرد گرچه سبب کاهش تعداد محدودیت‌ها می‌شود، کیفیت برنامه را پایین می‌آورد؛ مثلاً اگر استادی درخواست دارد که دروس وی در روزهای فرد برگزار شوند، در صورتی که تمام دروس را یک موجودیت در نظر بگیریم (همان‌گونه که در مدل‌های پیشین بوده است) در پایان ممکن است اگر به‌دلیل اختصاص جریمه به آن استاد، خواسته‌اش برآورده نشود، تمام دروس در روزهای زوج برگزار شوند. در صورتی که در مدل پیشنهادی با وزن‌دارکردن تک‌تک دروس هر استاد، تا جایی که امکان دارد دروس وی در روزهای فرد برگزار می‌شوند و در صورت تخصیص جریمه، تعداد خاصی از آن دروس، در روزهای زوج برگزار می‌شوند. مدل پیشنهادی با تخصیص جریمه، موجودیت‌های درون یک محدودیت را نیز وزن‌دار کرده است.

برای حل مدل پیشنهادی، متغیرهای تصمیم‌گیری بر روی دامنه‌های خود تعریف شده و محدودیت‌ها نیز مشخص می‌شوند. پس از تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری، محدویت‌های سخت و نرم براساس این متغیرها پیاده‌سازی می‌شوند.

درنظرگرفتن جریمه برای تمامی موجودیت‌هایی که به محدودیت‌های نرم تخصیص داده می‌شوند، سبب افزایش تعداد محدودیت‌هایی می‌شود که در هنگام اجرای مدل، باید در نظر گرفته شوند؛ مثلاً در مطالعهٔ موردی این پژوهش، پس از حل مدل توسط نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX تعداد محدودیت‌های حل‌شدهٔ درنظرگرفته‌شده نزدیک به ۳ میلیون عدد برآورد شده است. حل این تعداد محدودیت، تنها در مدل برنامه‌ریزی محدودیت امکان‌پذیر است. مدل پیشنهادی برای مطالعهٔ کاربردی این پژوهش در مدت‌زمان کمتر از ۲۰ دقیقه به جواب می‌رسد که نسبت به تعداد محدودیت‌های مسئله، بسیار مناسب است. البته باید در نظر گرفت که تابع هدف در برای حداقل‌سازی جریمه‌ها عمل می‌کند، درنتیجه ممکن است به‌دلیل تضاد در محدودیت‌ها، این مقدار به صفر نرسد؛ اما در مناسب‌ترین مقدار خود قرار می‌گیرد و این نقطه همان مطلوبیت حداکثری خروجی است که لزوماً برطرف‌کنندهٔ صددرصدی محدودیت‌های نرم نیست، ولی رضایت حداکثری از برنامه را حاصل می‌کند.

از جمله محدودیت‌های فنی مسئله، عدم به‌اصطلاح سفارشی‌سازی الگوریتم جستجوی انتخابی برای حل مسئله است. از آنجایی که زمان رسیدن به جواب بهینه در مدل‌های CP، ارتباط مستقیمی با الگوریتم حل آن دارد، سفارشی‌سازی الگوریتم جستجو با راه‌هایی نظیر تخصیص مقادیر اولیه به متغیرها و یا تقویت انتشار محدودیت، می‌توان در زمان بسیار مناسب‌تری به جواب بهینه رسید.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (٤): برنامهٔ هفتگی ترم هفتم مدیریت صنعتی با درنظرگرفتن تمام محدودیت‌ها

	شنبه	یک شنبه	دوشنبه	سه شنبه	چهارشنبه
۹-۸	دانش خانواده سرویسی				
۹-۱۰					
۱۱-۱۰	کنترل پروژه دکترع ۵-۷۱۰	مدیریت کارخانه دکترع ۱٦-۷۱۱			مدیریت کارخانه دکترع ۱۵-۷۱۱
۱۲-۱۱					کنترل پروژه دکترع ۱-۷۱۰
۱٤-۱۳					
۱۵-۱٤		طرح ریزی سیستم‌ها دکتر ک ۱۷-۷۱۱	مدیریت مواد دکتر ق ۲۳-۷۱۰	طرح ریزی سیستم‌ها دکتر ک ۲۵-۷۱۰	مدیریت دکتر ص ۲-۷۱۰
۱٦-۱۵					
۱۷-۱٦			مدیریت ایمنی دکتر ک ۱-۷۱۰	بهره وری دکتر ش ٤-۷۱۰	
۱۸-۱۷					

۸- پیشنهادهای آینده

با درنظرداشتن پیشنهادهای زیر و اعمال آنها، میزان رضایتمندی از خروجی مدل پیشنهادی را می‌توان افزایش داد. مدل پیشنهادی بعد از فرایند تخصیص برنامهٔ درسی دانشجویان، به حل مسئله می‌پردازد؛ می‌توان با یک دید کلی، فرایند تعیین دروسی را که یک دانشجو در هر ترم باید بگیرد نیز به گام‌های مدل اضافه کرد تا مدلی یکپارچه به دست آید. در این پژوهش هدف، دستیابی به یک جواب رضایت‌بخش است و الگوریتم‌های مورداستفاده برای جستجو، تنها به اول عمق محدود شده است. می‌توان الگوریتم‌های جستجوی مختلف را برای پیداکردن راه‌حل بهینه، امتحان کرد. از طرفی می‌توان با سفارشی‌سازی این الگوریتم‌ها، سرعت رسیدن به جواب بهینه را افزایش داد. می‌توان با اجرای مدل برای جدول زمان‌بندی برنامهٔ آموزشی تمام گروه‌ها، محدودیت‌ها و انتظارات جدید را شناسایی کرد و با درنظرگرفتن تمامی این خواسته‌ها مدلی پیشنهاد داد که خروجی آن با درنظرگرفتن این خواسته‌ها، بتواند در جهت ارتقای سطح علمی دانشجویان و همچنین افزایش بازده استادان حرکت کند. استفاده از مدل‌های چندمرحله‌ای نیز در تسریع حل مسئله مؤثر هستند. می‌توان مدل دومرحله‌ای طراحی کرد که در مرحلهٔ نخست، دروس را به استادان تخصیص دهد و سپس

Archive of SID

www.SID.ir

در مرحلهٔ دوم برای این دروس تخصیص داده شده، زمان‌بندی را اعمال کند.

منابع :

ثانی، غلامرضا و نمازی، مجید. (۱۳۸۳). «روشی جدید برای حل مسائل ارضای محدودیت». نشریهٔ علمی-پژوهشی استقلال، ۲۳(۱)، ۱۳-۱.

رحمانی، امیرمسعود؛ جولا امین و ناصری نرجس خاتون. (۱۳۸٦). «ارائهٔ یک جستجوی محلی جدید برای حل مسئلهٔ برنامه‌ریزی دروس دانشگاهی با استفاده از الگوریتم ممتیک». اولین کنگرهٔ مشترک سیستم‌های فازی و سیستم‌های هوشمند، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.

رستگارامینی، فرین و میرمحمدی، سیدحمید. (۱۳۹۱). «مدلسازی و ارائهٔ روش حل برای مسئلهٔ زمان‌بندی دروس دانشگاهی و تخصیص استاد-درس مطالعهٔ موردی دانشکده صنایع دانشگاه صنعتی اصفهان». نهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

غافری، اسماعیل. (۱۳۸۹). «حل مسئلهٔ جدول زمان‌بندی دروس دانشگاه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و رنگ‌آمیزی گراف». اولین کنفرانس دانشجویی فناوری اطلاعات ایران، سنندج، دانشگاه کردستان.

منجمی، سید امیرحسین؛ مسعودیان، سولماز؛ استکی، افسانه و نعمت‌بخش، ناصر. (۱۳۸۵). «طراحی جدول زمان‌بندی خودکار برای دروس دانشگاهی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک». نشریهٔ علمی پژوهشی فناوری آموزش، ٤(۲)، ۱۲۷-۱۱۳.

Al-Betar, M. A., Khader, A. T., & Zaman, M. (2012). "University course timetabling using a hybrid harmony search metaheuristic algorithm". *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, IEEE Transactions on, 42(5), 664-681 .

Barták, R. (2000). "Dynamic constraint models for planning and scheduling problems".*New trends in constraints*, Springer, 237-255.

Burke, E. K., & Petrovic, S. (2002). "Recent research directions in automated timetabling". *European Journal of Operational Research*, 140(2), 266-280 .

Carter, M. W. (1986)."OR Practice—A Survey of Practical Applications of Examination Timetabling Algorithms".*Operations research*, 34(2), 193-202 .

Chen, Y., Guan, Z., Peng, Y., Shao, X., & Hasseb, M. (2010). "Technology and system of constraint programming for industry production scheduling—Part I: A brief survey and potential directions". *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 5(4), 455-464 .

Garey, M. R., & Johnson, D. S. (2002). Computers and intractability (29th ed.). New York: W. H. Freeman & Co.

Havås, J., Olsson, A., Persson, J., & Schierscher, M. S. (2013). "Modeling and optimization of university timetabling-A case study in integer programming". Student Thesis, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden .

Kazarlis,S.,Petridis,V.,&Fragkou, P.(2005). "Solving University Timetabling Problems Using Advanced Genetic Algorithms". *GAs*, 2(7), 8-12 .

Leung, J. Y. (2004). Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis (1st ed.). London: Chapman and Hall/CRC

Lewis, R. (2008). "A survey of metaheuristic-based techniques for university timetabling problems". *OR spectrum*, 30(1), 167-190 .

Liess, O., & Michelon, P. (2008). "A constraint programming approach for the resource-constrained project scheduling problem". *Annals of Operations Research*, 157(1), 25-36 .

Lü, Z., & Hao, J.-K. (2010). "Adaptive tabu search for course timetabling". *European Journal of Operational Research*, 200(1), 235-244 .

Marriott, K., & Stuckey, P. J. (1998). Programming with constraints: an introduction (1st ed.).Cambridge,Massachusetts: MIT press.

Milano,M., & Wallace, M. (2006). "Integrating operations research in constraint programming". *4OR*, 4(3), 175-219 .

MirHassani, S. (2006). "A computational approach to enhancing course timetabling with integer programming". *Applied Mathematics and Computation*, 175(1), 814-822 .

Reis, L. P., & Oliveira, E. (2001). "A language for specifying complete timetabling problems". *Practice and Theory of Automated Timetabling III* ,322-341.

Sabar, N. R., Ayob, M., Kendall, G., & Qu, R. (2012). "A honey-bee mating optimization algorithm for educational timetabling problems". *European Journal of Operational Research*, 216(3), 533-543 .

Van Hentenryck, P., & Saraswat, V. (1997). "Constraint programming: Strategic directions". *Constraints*, 2(1), 7-33 .

Yang, S., & Jat, S. N. (2011). "Genetic algorithms with guided and local search strategies for university course timetabling". *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, IEEE Transactions on, 41(1), 93-106 .

Zibran, M. F. (2007). A multi-phase approach to university course timetabling (1st ed.). Lethbridge, Alta.: University of Lethbridge, Faculty of Arts and Science .

Zivny, S. (2012). The complexity of valued constraint satisfaction problems (1st ed.). Berlin: Springer Science & Business Media.

Archive of SID

www.SID.ir

پی نوشت :

[1] University Course Timetabling Problem
[2] Kazarlis
[3] Lewis
[4] Garey and Johnson
[5] Genetic algorithm
[6] Tabu search
[7] Bee colony algorithm
[8] Yang and Jat
[9] Lü and Hao
[10] Sabar et al
[11] Marriott and Stuckey
[12] Constraint propagation
[13] Constraint satisfaction problems
[14] Zivny
[15] Barták
[16] Reis and Oliveira
[17] Rudová and Murray
[18] Al-Betar et al
[19] Memetic Algorithm
[20] Hybrid Harmony Search Algorithms
[21] Hill climbing
[22] Particle Swarm Optimization
[23] Havås et al
[24] Liess and Michelon
[25] Linear programming
[26] Burke and Petrovic
[27] Carter
[28] Zibran
[29] Leung
[30] Froider
[31] Milano and Wallace
[32] Chen et al
[33] Van Hentenryck and Saraswat
[34] Generate - test
[35] Backtracking
[36] Depth first

Archive of SID

www.SID.ir