یازدهمین کنفرانس سیستمهای فازی ایران

دانشگاه سیستان و بلوچستان

ایران، زاهدان ۱۴ لغایت ۱۶ تیرماه ۱۳۹۰

زمانبندی کار کارگاهی فازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال

مسعود نصرت‌آبادی[۱]، مجید وفایی جهان[۲]، محمد رضا اکبرزاده توتونچی[۳]، مسعود قره جانلو[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر- نرم افزار، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد مشهد، مشهدMsd.Nosratabadi@gmail.com

[۲] استادیار گروه کامپیوتر- نرم افزار، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد مشهد، مشهدVafaeiJahan@mshdiau.ac.ir

[۳] استاد گروه برق و کامپیوتر، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهدAkbarzadeh@ieee.org

[۴] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر- نرم افزار، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد مشهد، مشهدGharehjanloo@yahoo.com

چکیده

مساله زمانبندی کارکارگاهی به‌بررسی نحوه توزیع کارها بین ماشین‌ها می‌پردازد به‌طوری که کارها در کمترین زمان ممکن انجام شوند. در این مساله فاکتورهایی نظیر زمان پردازش فعالیت‌ها و زمان موعد مقرر برای تحویل کارها، اغلب بصورت مبهم برای تحلیل‌گر تعریف می‌شوند. در چنین شرایطی، استفاده از پارامترهای فازی و اهداف چندگانه مبتنی بر علم فازی، لازم به‌نظر می‌رسد. که باعث ایجاد مساله زمانبندی کارکارگاهی فازی می‌شود. این مساله از مسائل غیر چندجمله‌ای (NP) می‌باشد، به‌همین دلیل روشی مبتنی بر الگوریتم اکتشافی اکسترمال پیشنهاد می‌شود. به‌طوریکه فعالیت‌های کم ارزش را با احتمال بیشتر تغییر می‌دهد، این باعث می‌شود تعداد فعالیت‌های کم ارزش، کمتر و تعداد فعالیت‌های با ارزش یکسان، بیشتر شود. در این حالت هر تغییر جزئی در زمانبندی، تغیرات زیادی در آن ایجاد می‌کند، بنابراین باعث فرار از بهینه محلی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر روی داده‌های آزمایشی ۶×۶ و ۱۰×۱۰، رضایتمندی مطلوبی از اهداف مساله را با سرعت همگرایی مناسب، در مقایسه با روش‌های دیگر نشان می‌دهد، درستی جواب‌ها و صحت روش پیشنهادی با استفاده از اصل همگرایی و آزمون آماری t اثبات شده است.

واژه های کلیدی: زمانبندی کارکارگاهی فازی، الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال، مسائل چند هدفه.

۱- مقدمه

دردهه گذشته، کاربرد مختلف مسائل زمان‌بندی درحوزه‌های مختلفی ازقبیل صنعت، اقتصاد و علوم پایه سبب شده تا تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گیرد. به طورخاص، تلاش‌های قابل توجهی در زمینه توسعه و تکامل الگوریتم‌های اکتشافی برای این منظور صورت گرفته است. مساله زمان‌بندی کارکارگاهی[۱] یکی از سخت‌ترین مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد که به عنوان یک مساله $NP-hard$ معروف است[۱]، بطوریکه تاکنون الگوریتم‌های اکتشافی زیادی برای حل آن پیشنهاد شده‌است. یکی از اولین تلاش‌های صورت گرفته جهت زمان‌بندی کارکارگاهی، ارائه نوعی الگوریتم ژنتیک بود که می‌توان آن را در کار تحقیقاتی دیویس[۲] در سال ۱۹۸۵ ملاحظه نمود[۲]. پس از آن تعداد قابل توجهی از کاربردهای الگوریتم ژنتیک و دیگر الگوریتم‌های اکتشافی در مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی به چشم می‌خورد[۳,۴,۵]. در این مقاله به دلیل ویژگی‌های خاص نوعی الگوریتم اکتشافی، به نام الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال[۶]، به حل نوعی مساله زمانبندی کار کارگاهی، با استفاده از این الگوریتم پرداخته می‌شود. در مسائل زمان‌بندی کارکارگاهی ، فاکتورهای مختلفی از جمله زمان پردازش هر فعالیت و زمان موعد مقرر تحویل کار، به صورت مقادیری دقیق و قطعی تعریف می‌گردد. البته به هنگام فرمول‌بندی مسائل زمان بندی کارکارگاهی، بسیاری از فاکتورها بطور ناقص یا مبهم برای تحلیل‌گر تعریف می‌شوند[۷]. این مشکل بطور خاص در بسیاری از موقعیت‌های دنیای واقعی، مخصوصا هنگامی که عوامل انسانی در اینگونه مسائل دخیل می‌گردند، صادق می‌باشد. در چنین شرایطی، در نظر گرفتن زمان پردازش فازی با توجه به عوامل انسانی مناسب‌تر می‌باشد و زمان موعد مقرر فازی نیز باعث تحمل تاخیر احتمالی در زمان انجام کار می‌شود. به طور واضح‌تر، با ملاحظه برخی از عوامل انسانی موجود در عملیات و برنامه‌ریزی زمانبندی کار کارگاهی، بطور غیر قابل انکاری به فازی بودن زمان‌های پردازش، پی برده می‌شود و با توجه به زمان‌های موعد مقرر تحویل کارها می‌توان موقعیت‌های مختلفی را در نظر گرفت، که در آنها رضایتمندی زمان موعد مقرر مطلوب می‌باشد و البته با مقدار معینی تاخیر، درجه رضایتمندی کاهش می‌یابد. گری[۳]

[۱] Job shop scheduling problem

[۲] Davis

[۳] Garey

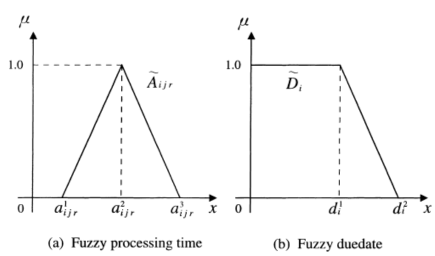
وهمکارانش [۱,۸] ثابت کردند که مساله زمانبندی کار کارگاهی یک مساله $NP-hard$ است، بنابراین از آنجایی که مساله زمانبندی کار کارگاهی فازی بسط مساله زمانبندی کار کارگاهی با زمان پردازش فازی برای هرفعالیت و زمان موعد مقررفازی برای تحویل هر کار می باشد، این مسئله قویا $NP-hard$ خواهد بود. به همین دلیل در این مقاله برای ایجاد حل مساله زمانبندی کار کارگاهی از الگوریتم اکتشافی بهینه‌سازی اکسترمال استفاده می‌شود. به طور معمول برای مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی از جمله مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی فازی تنها یک تابع هدف در نظر گرفته می‌شود، اما برای انعکاس مناسب‌تر موقعیت‌های دنیای واقعی، در زمانبندی کار کارگاهی فازی، استفاده از توابع چندهدفه مطلوب و لازم به نظر می‌رسد، بدین منظور در این مقاله یک زمان‌بندی چند هدفه تعریف می‌شود. از این رو بر اساس زمان تکمیل فازی هر کار، زمان موعد مقرر فازی برای تحویل هر کار و شاخصی برای بیان میزان رضایتمندی زمان انجام هر کار، در برابر زمان موعد مقرر تحویل آن کار(شاخص توافق[۴])، زمان‌بندی چند هدفه کار کارگاهی فازی، با سه هدف: بیشینه کردن مینیمم شاخص توافق، بیشینه کردن میانگین شاخص توافق و کمینه کردن ماکزیمم زمان تکمیل فازی کارها تعریف می‌شود[۹] . علاوه بر این، با در نظر گرفتن ماهیت غیر قطعی تصمیم‌گیری‌های انسانی، فرض می‌شود که فرد تصمیم گیرنده برای هر یک از توابع هدف، دارای یک هدف فازی می‌باشد و بعد از مشخص کردن توابع عضویت خطی این اهداف، برای ادغام آنها، از روش فازی بلمن[۵] و زاده[۶] [۱۰] یا عملگر مینیمم استفاده می‌شود. برای بیان کارآمدی الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال جهت زمانبندی کار کارگاهی فازی و مشاهده نتایج آن، از مجموعه داده‌های عددی ۶ × ۶ و۱۰ × ۱۰ ، که در [۳] ارئه شده است، استفاده می‌شود. در ادامه در بخش ۲ مساله کار کارگاهی فازی تعریف می‌شود و در بخش ۳ عملگرهای فازی استفاده شده توضیح داده می‌شود و سپس در بخش ۴ اهداف مساله مطرح می‌شود، در بخش ۵ روش پیشنهادی بیان می‌شود و در نهایت شبیه‌سازی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی همراه با آزمون آماری جهت اثبات درستی روش پیشنهادی، بیان می‌شود.

۲- تعریف مساله کار کارگاهی فازی

در مساله زمانبندی کار کارگاهی r ماشین$M=\{M_1,\dots,M_r\}$ و n کار $j=\{j_1,\dots,j_n\}$ وجود دارد که در آن کارها باید بر روی ماشین‌ها پردازش شوند. در این مدل می‌توان فرض کرد که هر کاری باید بر روی همه ماشین‌ها پردازش شود. پردازش کار j بر روی ماشین i یک فعالیت نامیده می‌شود و به‌صورت زوج مرتب (i,j) و یا به‌صورت $O_{i,j}$ نشان داده می‌شود و همچنین هر کار شامل m عملیات می باشد $O=\{O_{i1},\dots,O_{im}\}$. بین هر دو فعالیت، یک کار، یک رابطه پیش نیازی وجود دارد، ولی بین هر دو فعالیت از کارهای مختلف هیچ گونه رابطه پیش نیازی وجود ندارد. هر یک از کارها برای پردازش بر روی ماشین‌ها دارای یک مسیر پردازش مختص خود است که بوسیله توالی ماشین‌ها مشخص می‌شود و در واقع روابط پیش‌نیازی ما بین فعالیت‌های آن را نشان می‌دهد. علاوه بر محدودیت‌های فوق، مفروضات و محدودیت‌های دیگری نیز وجود دارد که عبارتند از [۱۱,۱۲]:

۱. یک کار، دو بار روی یک ماشین اجرا نمی شود.
۲. از هر ماشین فقط یک نوع در کارگاه موجود است.
۳. پس از شروع عملیات با یک ماشین قطع آن مجاز نیست.
۴. هر ماشین در یک زمان فقط می‌تواند یک عملیات را انجام دهد.
۵. هر ماشین پیوسته برای تولید در دسترس است.
۶. یک کار به طور همزمان نمی تواند روی چند ماشین اجرا شود.

یکی از فاکتورهای مهمی که در مساله زمانبندی کار کارگاهی وجود دارد زمان موعد مقرر برای تحویل هر کار می‌باشد، منظور از زمان موعد مقرر، حداکثر زمانی است که برای تکمیل یک کار در نظر گرفته می‌شود که در واقع زمان تکمیل هر کار باید کمتر از زمان موعد مقرر آن کار باشد. بر خلاف مساله زمانبندی کلاسیک $n\times m$، در این مساله زمان پردازش هر عمل و زمان موعد مقرر هر کار به صورت مقادیری فازی می‌باشند. در مساله زمانبندی کار کارگاهی فازی، زمان پردازش عملیات $O_{i,j,r}$ از طریق متغیر مثلثی فازی $\tilde{A}_{i,j,r}$ که بصورت سه‌تایی $(a^1_{k,i,r},a^2_{k,i,r},a^3_{k,i,r})$ نشان داده می‌شود، بیان می‌شود (شکل $1.a$). همچنین زمان موعد مقرر مربوط به کار i با متغیر فازی $\widetilde{D}_i$ که بصورت دوتایی$(d^1{}_i,d^2{}_i)$ مشخص است، بیان می‌شود(شکل$1.b$) [۳].



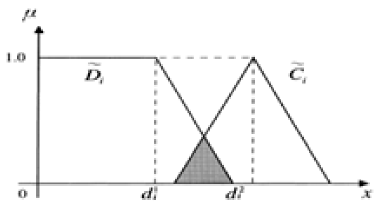
شکل۱) زمان پردازش فازی و زمان موعد مقرر فازی[۳]

زمان تکمیل فازی هر کار نیز به صورت یک عدد مثلثی قازی نمایش داده می‌شود و برای اینکه در مساله زمانبندی کار کارگاهی فازی، درجه رضایتمندی زمان تکمیل هر کار نسبت به زمان موعد مقرر آن کار محاسبه شود، شاخصی به نام شاخص توافق تعریف می‌شود که با توجه به شکل (۲) مقدار شاخص توافق، برابر با مقدار فضای مشترک

---
[۴] Agreement index
[۵] Bellman
[۶] Zadeh

بین دو مقدار زمان تکمیل کار فازی و زمان موعد مقرر فازی، تقسیم بر فضای تکمیل کار فازی است[۳].

$$AI = \frac{area(\tilde{C}_i \cup \tilde{D}_i)}{area\,(\tilde{C}_i)} \qquad (۱)$$



شکل۲) شاخص توافق(IA)[۳]

درواقع شاخص توافق انعطاف‌پذیری مساله کار کارگاهی فازی را در برابر وجود محدودیت زمان موعد مقرر نشان می‌دهد

۳- عملگرهای فازی

بدست آوردن زمان تکمیل هر فعالیت می‌بایست زمان پردازش فعالیت را، با زمان شروع آن فعالیت جمع کنیم، که برای جمع دو عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a^۱, a^۲, a^۳)$ و $\tilde{B} = (b^۱, b^۲, b^۳)$ بصورت زیر عمل می‌شود[۱۳]:

$$A + B = (a^۱ + b^۱, a^۲ + b^۲, a^۳ + b^۳) \qquad (۲)$$

واضح است که برای بدست آوردن زمان تکمیل هر کار نیز از عملگر جمع استفاده می‌شود. عملگر دیگری که استفاده می‌شود، عملگر ماکزیمم می‌باشد که برای بدست آوردن زمان شروع یک فعالیت استفاده می‌شود، زمان شروع برای فعالیت $O_{i,j,r}$، مقدار ماکزیمم بین زمان تکمیل فعالیت قبلی در کار j و زمان تکمیل فعالیت قبلی بر روی ماشین r می‌باشد، برای ماکزیمم‌گیری دو عدد فازی مثل $\tilde{A} = (a^۱, a^۲, a^۳)$ و $\tilde{B} = (b^۱, b^۲, b^۳)$ که توابع عضویت آنها را با $\mu_{\tilde{A}}$ و $\mu_{\tilde{B}}$ نشان می‌دهیم، با توجه به روش زاده تابع عضویت $\mu_{\tilde{A}\vee\tilde{B}}(z)$ ماکزیمم $(\tilde{A} \vee \tilde{B})$ بصورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu_{\tilde{A}\vee\tilde{B}}(z) = sup\,min(\,\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)) \qquad (۳)$$

اما به دلیل اینکه عدد فازی بدست آمده از عملگر ماکزیمم فوق، یک عدد فازی مثلثی نمی‌باشد، عملیات ماکزیمم‌گیری به صورت زیر تقریب زده می‌شود[۱۴]:

$$A \vee B = (a^۱ \vee b^۱, a^۲ \vee b^۲, a^۳ \vee b^۳) \qquad (۴)$$

در زمانبندی کار کارگاهی فازی، زمان تکمیل هر کار نیز بصورت یک مقدار مثلثی فازی می‌باشد و از این رو زمانی‌که کمینه‌شدن ماکزیمم زمان تکمیل فازی، به عنوان یکی از اهداف زمانبندی در نظر گرفته می‌شود، نیاز به رتبه بندی کلی[۷] کارها، بر حسب زمان تکمیل آنها می‌باشد. متاسفانه عملگر ماکزیمم که پیش‌تر به آن اشاره شد نمی‌تواند برای این رتبه بندی استفاده شود، در این مقاله از روش مرتب سازی اعداد فازی [۱۵] که بر پایه استفاده از سه ضابطه زیر است، استفاده می‌شود.

$$C_{r۱}(A) = \frac{a^۱ + ۲a^۲ + a^۳}{۴}, \quad C_{r۲}(A) = a^۲, \quad C_{r۳}(A) = a^۳ - a^۱ \qquad (۵)$$

روند الگوریتم به این صورت است:

Algorithm ۱: Ranking Method for *TFNs*
۱: order the *TFNs* according to the value of $Cr_۱$
۲: if there are *TFNs* whit identical value of $Cr_۱$ then
۳: order these *TFNs* using the real value $Cr_۲$
۴: if there are *TFNs* with identical value of $Cr_۱$ and $Cr_۲$ then
۵: rank then using $Cr_۳$

۴- اهداف مساله

به طور معمول برای مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی، تنها یک تابع هدف در نظر گرفته می‌شود، اما برای انعکاس مناسب‌تر موقعیت-های دنیای واقعی، در زمانبندی کار کارگاهی فازی، استفاده از توابع چندهدفه مطلوب و لازم به نظر می‌رسد، بدین منظور در این مقاله یک زمان‌بندی چند هدفه تعریف می‌شود. همانطور که اشاره شد شاخص توافق برای بیان درجه رضایتمندی زمان تکمیل کار نسبت به زمان موعد مقرر تحویل آن کار می‌باشد، برای بیان درجه رضایتمندی حاصل از شاخص توافق برای کل کارها، میانگین شاخص توافق کل کارها بدست می‌آید و سعی می‌شود که بیشینه شود، بنابراین اولین هدف مساله زمانبندی کار کارگاهی فازی در این مقاله بیشینه کردن میانگین شاخص توافق بیان می‌شود. در این زمانبندی باید از ارضا شدن تمامی زمان‌های موعد مقرر اطمینان حاصل شود، بنابراین هدف دوم برای زمانبندی کار کارگاهی فازی بیشینه کردن مینیمم شاخص توافق می-باشد. سومین هدف از زمانبندی کار کارگاهی فازی مانند زمانبندی کار کارگاهی کلاسیک، کمینه کردن ماکزیمم زمان تکمیل کارها می‌باشد. بنابراین سه هدف مساله را می‌توان بصورت زیر بیان کرد[۳،۱۶]:

$$G_۱ : Maximize\ Z_۱ = \frac{۱}{n}\sum_{i=۱}^{n} AI_i \qquad (۶)$$

$$G_۲ : Maximize\ Z_۲ = min_{i=۱,\dots,n} AI_i \qquad (۷)$$

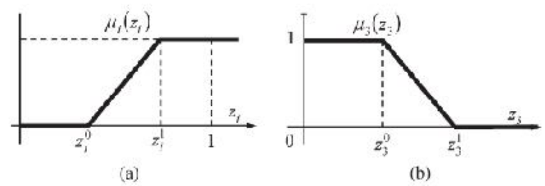
$$G_۳ : Minimize\ Z_۳ = C_{r۱}(C_{max}) \qquad (۸)$$

---
[۷] Total ordering

برای بدست آوردن درجه رضایتمندی اهداف سه‌گانه و تابع تناسب کلی برای زمانبندی کار کارگاهی فازی از یک چارچوب تصمیم‌گیری فازی استفاده می‌شود[۱۰]، از این رو درجه رضایتمندی سه هدف فوق برابر است با:

$$\mu_D(s) = min\left(\mu_{G_۱}(s), \mu_{G_۲}(s), \mu_{G_۳}(s)\right) \qquad (۹)$$

به‌طوریکه در رابطه بالا μ_{Gi} نشان دهنده درجه رضایتمندی از هدف G_i و $i = ۱,۲,۳$ بوده و هدف کلی پیدا کردن برنامه زمانی $s \in S$ می‌باشد که درجه رضایت $\mu_D(s)$ را ماکزیمم نماید.



شکل۳) توابع عضویت اهداف سه گانه برای محاسبه درجه رضایتمندی[۳]

برای مطرح کردن دقیق مقدار برازندگی مساله، درجه رضایتمندی اهداف سه گانه باید تعریف شوند. در مورد دو هدف اول و دوم $(G_۱, G_۲)$ در صورتیکه $z_i = ۰$، $i = ۱,۲$ باشد، درجه رضایتمندی صفر خواهد بود و در صورتیکه $z_i = ۱$، $i = ۱,۲$ باشد، درجه رضایتمندی یک خواهد بود، در واقع کاملا راضی کننده است. علاوه بر این با افزایش مقدار z_i و$i = ۱,۲$ از صفر به یک، درجه رضایتمندی نیز افزایش می‌یابد، بنابراین درجه‌های رضایتمندی برای دو هدف اول توسط $\mu_{Gi}(s) = \mu_i(z_i)$ $i = ۱,۲,$ بدست می‌آید که $\mu_i: [۰,۱] \to [۰,۱]$ یک تابع صعودی است، به طوری که $\mu_i(۰) = ۰$، $\mu_i(۱) = ۱$، $i = ۱,۲$ می‌باشد[۱۰] که بصورت یک تابع خطی تعریف می‌شود (رابطه۱۰):

$$for\ i = ۱,۲, \quad \mu_i(z_i) = \begin{cases} ۰ & z_i \le z_i^۰ \\ \dfrac{z_i - z_i^۰}{z_i^۱ - z_i^۰}, & z_i^۰ < z_i < z_i^۱ \\ ۱, & z_i \ge z_i^۱ \end{cases} \qquad (۱۰)$$

به‌طوریکه $z_i^۰ < z_i^۱$، $i = ۱,۲$ نمایانگر مقادیری می‌باشند که به‌ترتیب حداقل و حداکثر رضایت را فراهم می‌نمایند(شکل۳-a). درجه رضایتمندی برای هدف سوم $(G_۳)$ از طریق $\mu_{G۳}(s) = \mu_۳(z_۳)$ حاصل می‌شود به طوریکه $\mu_۳: [۰,\infty] \to [۰,۱]$ یک تابع نزولی می‌باشد[۱۰]. $\mu_۳$ نیز به صورت یک تابع خطی تعریف می‌شود(رابطه۱۱):

$$\mu_۳(z_۳) = \begin{cases} ۱ & z_۳ \le z_۳^۰ \\ \dfrac{z_۳ - z_۳^۱}{z_۳^۰ - z_۳^۱}, & z_۳^۰ < z_۳ < z_۳^۱ \\ ۰, & z_۳ \ge z_۳^۱ \end{cases} \qquad (۱۱)$$

به‌طوریکه $z_۳^۰ < z_۳^۱$ نمایانگر مقادیری می‌باشند که به‌ترتیب حداکثر و حداقل رضایت را فراهم می‌کنند(شکل۳-b).

مقادیر دو پارامتر $z^۰$ و $z^۱$ در روابط فوق از طریق آزمایش بدست می‌آیند. در نهایت تابع هدف کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(s) = min\ \{\mu_۱(z_۱), \mu_۲(z_۲), \mu_۳(z_۳)\} \qquad (۱۲)$$

به طوریکه s یک برنامه زمانی ممکن می‌باشد. در نهایت جواب مساله کار کارگاهی فازی، یک زمانبندی می‌باشد، که بیشترین مقدار برازندگی را بر اساس تابع هدف دارا باشد.

۵- زمانبندی کارکارگاهی فازی با الگوریتم اکسترمال

الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال[۸] الگوریتمی اکتشافی است که از بک-اسنپن[۱۵] الهام گرفته شده است. مشخص‌ترین تفاوت الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال و دیگر الگوریتم‌های اکتشافی نظیر الگوریتم ژنتیک، نیاز الگوریتم به دانستن شایستگی سلول‌ها (شایستگی محلی) علاوه بر شایستگی کلی جواب است. در واقع این ویژگی الگوریتم بهینه سازی اکسترمال، هسته مرکزی و عامل کار آن است[۱۵]. حل مساله کار کارگاهی دارای دو مرحله می‌باشد، اول اینکه نیازمند پیدا کردن یک برنامه زمانی قابل اجرا می‌باشد، به طوریکه تمام محدودیت‌ها بر قرار شوند و دوم اینکه، این برنامه زمان‌بندی باید بهینه باشد، که در این صورت لازم است اهداف مساله به بهترین نحو ارضا شوند.

۵-۱ ساختار پاسخ

در این مقاله از روش نمایش بر مبنای فعالیت[۱۲] برای نمایش جواب مساله استفاده شده است در روش مبتنی بر فعالیت هر خانه از جواب، برای یک فعالیت در نظر گرفته شده است، که هر خانه خود به دو بخش تقسیم می‌شود.

برازندگی محلی	۰.۲۳۴	۰.۷۵۰	۰.۳۳۵	۰.۷۸۱	۰.۹۲۹	۰.۱۲۷	۰.۸۱۱	۰.۴۸۳	۰.۶۴۱
اطلاعات فعالیت	۳	۲	۲	۱	۱	۲	۳	۱	۳
	J۳۱	J۲۱	J۲۲	J۱۱	J۱۲	J۲۳	J۳۲	J۱۳	J۳۳
	M۱	M۱	M۲	M۱	M۲	M۳	M۲	M۳	M۳

شکل۴) نمایش ساختار جواب با روش مبتنی بر فعالیت، برای یک مساله 3 × 3 [۱۲]

[۸] Extremal optimization

یکی برای اطلاعات مربوط به فعالیت و دیگری مقدار تابع تناسب محلی می‌باشد (شکل۴)، در این ساختار برای یک مساله n کار و m ماشین هر جواب شامل $n \times m$ خانه خواهد بود، هر کار دقیقا m مرتبه ظاهر می‌شود و هر مرتبه به یک فعالیت تعلق دارد.

۵-۲ ایجاد برنامه زمانی فعال

در زمانبندی کار کارگاهی، جستجوی برنامه زمانی بهینه، محدود به فضای زمان بندی فعال[۹] می‌شود. یک زمان بندی موجه، فعال نامیده می شود اگر نتوان آن را تغییر داد به نحوی که تعدادی از عملیات زودتر تکمیل شوند بدون اینکه عملیاتی دیرتر به پایان برسند. در یک زمانبندی فعال به محض اینکه ماشین و کار برای پردازش آماده باشند، پردازش کار انجام می‌شود. الگوریتم G&T به عنوان فرایندی برای ایجاد زمانبندی‌های فعال در نظر گرفته می‌شود[۹]. از این الگوریتم می‌توان به عنوان مبنایی برای الگوریتم اکسترمال درحل مسائل کار کارگاهی فازی استفاده نمود. در این الگوریتم با توجه به هر فعالیت $O_{i,j}$، زمان شروع، توسط $ST(O)$ نشان داده می‌شود و مدت زمان آن وظیفه نیز توسط $du\,(O)$ نمایش داده می‌شود. توجه داشته باشید که زمان تکمیل فعالیت نیز یک عدد مثلثی فازی $C(O)$ می‌باشد.

Algorithm۲: Fuzzy G&T

$A = \{O_{i۱}, i = ۱, \dots, n\}$; /*fitness task of each job*/
while $A \neq \emptyset$ do
find the task $\theta' \in A$ whit minimum earliest completion time /* $C(O')^{۳}$ /*
Let M' be the machine required by O' and B the subset of tasks in A requiring machine M'
Remove from B any task O that cannot overlap whit O'; /* $ST(O)^{۱} > C(O')^{۳}$/*
select $O^* \in B$ according to some criterion (e.g., randomly) to be scheduled;
Remove O^* from A and insert in A the task following O^* in the job if O^* is not the last task of its job.

از آنجا که زمان تکمیل به صورت یک عدد فازی مثلثی نشان داده می‌شود، در اجرای این الگوریتم در زمانبندی کار کارگاهی فازی، انتخاب یکی از این سه عدد به عنوان استاندارد، لازم می‌باشد، در این مقاله $C(O')^{۳}$ به عنوان یک استاندارد انتخاب شده است.

۵-۳ برازش محلی

همانطور که بیان شد ویژگی اصلی و هسته مرکزی اجرای الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال، نیاز الگوریتم به دانستن شایستگی سلول‌ها (شایستگی محلی)، علاوه بر شایستگی کلی جواب است. برای بدست آوردن شایستگی محلی فعایت‌ها، زمان بیکار بودن فعالیت، از زمان پایان فعالیت قبلی در آن کار بدست می‌آید و همچنین مجموع زمان بیکاری، کاری که فعالیت به آن اختصاص دارد، محاسبه می‌شود، که در نهایت با توجه این مقادیر، مقدار برازندگی محلی هر کدام از فعالیت‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Local\ fit(O_{i,j}) = \frac{۱}{gap(O_{i,j}) + gap(j)} \qquad (۱۳)$$

در رابطه فوق $gap(O_{i,j})$ زمان بیکار بودن فعالیت و $gap(j)$ زمان بیکاری کار j می‌باشد، این دو زمان بصورت اعداد فازی مثلثی می‌باشند که برای بدست آوردن مقادیر غیر فازی از روابط استفاده شده در الگوریتم رتبه‌بندی استفاده می‌شود.

۵-۴ اجرای الگوریتم

مراحل کلی زمانبندی کار کارگاهی فازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال با پارامتر τ به شرح زیر است :

Algorithm ۳ : τ − Eo algorithm for MOFJSSP

Set a job schedule selected from the fuzzy *G&T* algorithm as the initial permutation *P*
Do{
$Iteration++$;
compute its total fitness, and $Pbest = P$, and $best\ total\ fitness = total\ fitness$;
Compute the local fitness $O_{i,j}$ of schedule *P; /** by formula (۱۰) /*
Rank the species according to their fitness $O_{i,j}$; Generate a random value rand $\in [۰,۱]$;
If $p_{i,j}(k) = k^{-\tau} > rand$, execute swap operation $S_{i,j}$, otherwise repeat the choosing process until some swap mutation was chosen;
Based on the activity processing sequence for any job after exchange, dissolve the conflict occurred; /* Based on the priority number any activities, generate a new solution with ordering /*
Set $P = P'$ and calculate the current total fitness;
$TotalFitness > TotalFitness_{best}$, *set* $TotalFitness_{best} = TotalFitness$ and $P_{best} = P$;
}while (Termination)
Output the best schedule

.

الگوریتم فوق تمام جواب ممکن را در نظر می‌گیرد، این مطلب بیانگر این موضوع است که این الگوریتم به طور قطع از بهینه محلی فرار می-کند. پارامتری به نام τ در الگوریتم وجود دارد که با تنظیم آن فضای

[۹] active

جستجو تغیر می‌کند، به این شکل که برای $\tau \to \infty$ الگوریتم، فضای جستجو را محدود کرده و جستجوی آن بصورت محلی انجام می‌گیرد و برای $\tau \to ۰$ فضای جستجو افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث می‌شود که الگوریتم از بهینه محلی فرار کند و در واقع به دلیل خاصیت "بهمن گونه"، الگوریتم اکسترمال می‌تواند از بهینه محلی فرار کند و حالات بیشتری را بررسی و بهترین زمانبندی ممکن را بیابد، در این روش با توجه به آزمایشات انجام شده مقدار τ برابر با ۱.۴ گرفته شده است که باعث می شود تمامی فضای جستجو بررسی شود.

۶- شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی

نتایج ارائه شده در این بخش براساس داده آزمایشی موجود در [۳] ارائه شده است که دارای دو مجموعه داده ۶×۶ و همچنین دو مجموعه ۱۰×۱۰ می‌باشد. که در هر مجموعه داده، زمان پردازش فعالیت‌ها بصورت مقادیر مثلثی فازی و همچنین زمان موعد مقرر بصورت دوتایی فازی بیان شده است. الگوریتم پیشنهادی توسط نرم افزار Matlab شبیه‌سازی شده و توسط پردازنده اینتل ۲.۱۳ GHz تحت سیستم عامل XP اجرا شده است. برای مشاهده و مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل مساله زمانبندی کار کارگاهی فازی، بیست اجرای متفاوت، بر روی داده‌های آزمایشی انجام می‌شود، که میانگین و بهترین مقدار برازندگی کلی و همچنین زمان اجرا برای هر داده آزمایشی محاسبه می‌شود که در دو جدول شماره (۱) و (۲) نشان داده شده است و با الگوریتم های ژنتیک و تبرید تدریجی که در [۳] آمده است مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی در تمامی آزمایش‌ها به بهترین جواب دست پیدا می‌کند و در مقایسه با الگوریتم تبرید تدریجی بسیار بهتر عمل می‌کند و اگر چه در مقایسه با الگوریتم ژنتیک نتایجی تقریبا برابر حاصل می‌شود اما الگوریتم اکسترمال دارای دقت و سرعت همگرایی بالا می‌باشد.

مجموعه داده	روش	تعداد بهترین جولب	میانگین زمان اجرا(ثانیه)	میانگین جواب (برازندگی کلی)	بهترین جواب (برازندگی کلی)
اول	EO	۱۹	۱۱	۰.۷۶۰	۰.۷۸۱
	GA	۱۸	۴۴	۰.۷۶۱	۰.۷۷۵
	SA	۹	۵۳	۰.۷۰۴	۰.۷۷۵
دوم	EO	۱۹	۱۴	۰.۷۸۴	۰.۸۰۳
	GA	۱۹	۴۳	۰.۷۷۹	۰.۷۹۲
	SA	۲	۵۲	۰.۴۲۳	۰.۷۹۲

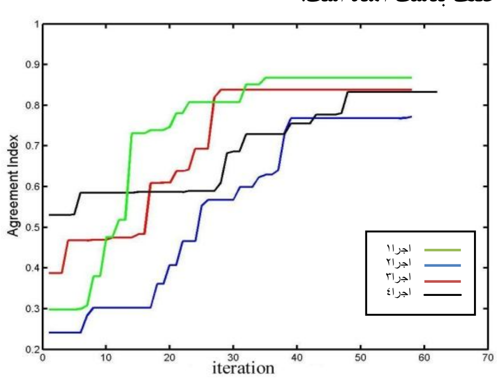
جدول۱) نتایج آزمایشگاهی مقدار برازندگی کلی برای داده آزمایشی۶×۶

مجموعه داده	روش	تعداد بهترین جولب	میانگین زمان اجرا(ثانیه)	میانگین جواب (برازندگی کلی)	بهترین جواب (برازندگی کلی)
اول	EO	٦	۳۲	۰.٦۰۷	۰.۸۲۱
	GA	۱	۱۲۰۵	۰.۵۷٤	۰.۷۱٤
	SA	۰	۱۲۸٦	۰.٤۱۱	۰.٦۲۷
دوم	EO	۱۱	۳۷	۰.۷٤۸	۰.۸۱٤
	GA	۸	۱۱۵۸	۰.۷۲۲	۰.۸۱۸
	SA	۰	۱۲٤۵	۰.٤۹۳	۰.٦۸۸

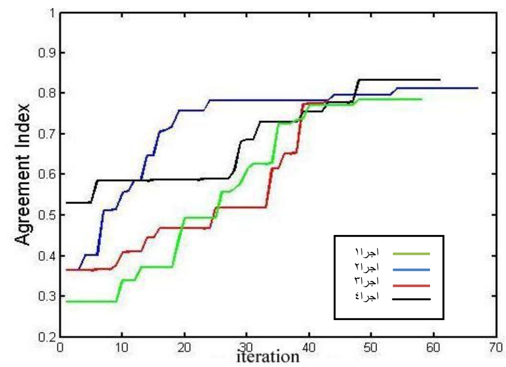
جدول۲) نتایج آزمایشگاهی مقدار برازندگی کلی برای داده آزمایشی ۶×۶

۶-۱ پایداری و یکنواخت بودن الگوریتم پیشنهادی

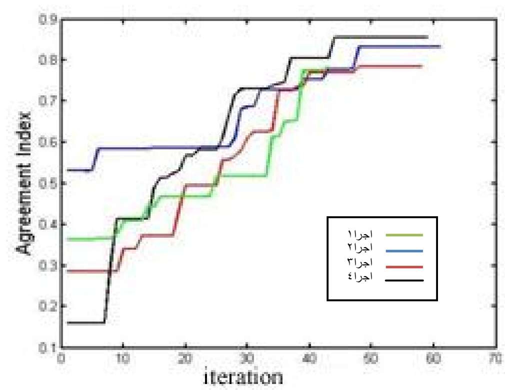
پایداری و یکنواخت بودن الگوریتم پیشنهادی در بدست آوردن جواب‌های مطلوب یکی از ویژگی‌های روش حل مساله زمانبندی کارکارگاهی می‌باشد و همچنین یکی از دلایلی که نشان می‌دهد روش پیشنهادی برای حل مساله، موجه می‌باشد. برای نشان دادن این پایداری، بر روی هر یک از داده‌ها، چهار مرتبه شبیه‌سازی اجرا شده است و منحنی‌های همگرایی الگوریتم اکسترمال، بر روی داده‌های آزمایشی مختلف بدست آمده است.



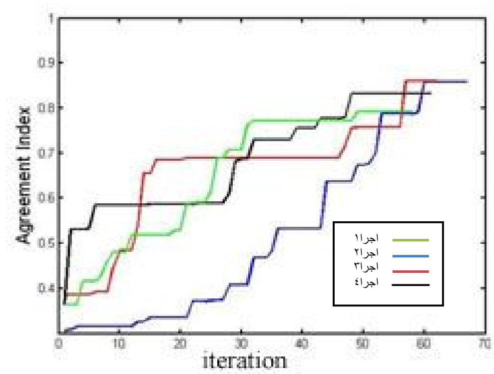
شکل۵) منحنی‌های همگرایی الگوریتم اکسترمال مجموعه داده ۶×۶ اول



شکل۶) منحنی‌های همگرایی الگوریتم اکسترمال مجموعه داده ۶ × ۶ دوم



شکل۷) منحنی‌های همگرایی الگوریتم اکسترمال مجموعه داده ۱۰ × ۱۰ اول



شکل۸) منحنی‌های همگرایی الگوریتم اکسترمال مجموعه داده 10 × 10 دوم

برای نمایش منحنی‌های همگرایی الگوریتم اکسترمال برای همه مجموعه داده‌ها، از یکی از اهداف سه‌گانه مساله، به نام میانگین شاخص توافق استفاده شده است همانگونه که مشاهده می‌شود این مقدار در روند اجرایی روش پیشنهادی، به سمت مقدار مطلوبی همگرا می‌شود. همگرایی منحنی‌های بدست آمده در اشکال (۵،۶،۷و۸) نشان دهنده پایداری روش پیشنهادی در حل مساله زمان‌بندی کار کارگاهی فازی می‌باشد، به طوری که در هر شکل هر منحنی نشان دهنده یک اجرای مستقل برای حل مساله مربوطه می‌باشد. منظور از پایداری، بهبود یکنواخت جواب در مسیر حل مساله می‌باشد که یکی از مزیت‌های روش پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌های انجام شده برای زمانبندی مساله کار کارگاهی فازی می‌باشد.

۶-۲ آزمون آماری

میانگین مقادیر برازندگی حاصل از اجراهای مختلف الگوریتم اکسترمال بر روی مساله زمانبندی کارکارگاهی فازی در جداول ۲و۳ آمده است و نشان می‌دهد که متوسط مقدار برازندگی موجود در تمامی اجراها، به سمت ۱ همگرا می‌شود، که نشان دهنده درستی جواب است[۹,۱۹].

Analysis Input variable(s)	٦ × ٦ sample t f	H_0: Mean = ٠.٨٤ H_a: Mean < ٠.٨٤ confidence : ٩٩
	١٠ × ١٠ sample t f	H_0: Mean = ٠.٨١ H_a: Mean < ٠.٨١ confidence : ٩٩

t-Test Analysis

Data set	N	Std.Dev.	T	df	p-value
f ۶×۶	۱۰۰	۰.۰۷۱۳	-۰.۰۹۵	۹۹	۰.۴۶۳
f ۱۰×۱۰	۱۰۰	۰.۰۸۶۶	-۰.۰۹۵	۹۹	۰.۴۵۶

جدول۳) تحلیل آزمون t بر روی مقدار تابع برازندگی

در این مقاله برای تایید این مطلب، پس از نرمال‌سازی فرضیه، از آزمونt، ٪۹۵ برای داده‌های ۶ × ۶ و ۱۰ × ۱۰ استفاده می‌شود[۱۹]. فرضیه H_0 برای مجموعه داده ۶ × ۶ برابر با میانگین ۰.۸۴ و برای مجموعه داده ۱۰ × ۱۰ برابر با میانگین ۰.۸۱ می‌باشد[۹] و فرضیه H_a برای مجموعه داده ۶ × ۶ برابر با مقدار میانگین کمتراز ۰.۸۴ و برای مجموعه داده ۱۰ × ۱۰ برابر با مقدارمیانگین کمتر از ۰.۸۱ می‌باشد[۹]. همچنین مقدار واریانس و انحراف معیار مجموعه جواب‌ها محاسبه شده است. مقدار p به دست آمده از این آزمون به ترتیب برابر با مقادیر ۰.۴۶۳ و ۰.۴۵۶ می‌باشد که برای رد فرضیه H_0 بسیار بزرگ می‌باشند. از اینرو به نظر می‌رسد که هیچ چیز نمی‌تواند نشان دهد که مقدار برازندگی به ترتیب به سمت مقداری کمتر از ۰.۸۱ و ۰.۸۴ میل کند. تمامی داده‌های مرتبط به این تحلیل آماری در جدول ۳ ارائه شده است. نمودارهای فراوانی جواب‌های بدست آمده در غالب درجه رضایتمندی از برنامه زمانی برای دو مجموعه داده‌ی ۶ × ۶ و ۱۰ × ۱۰ در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، با در نظر گرفتن زمان پردازش فازی و زمان موعد مقرر فازی، مساله زمان‌بندی کارکارگاهی فازی مطرح می‌شود. با توجه به شاخص توافق، زمان تکمیل فازی و زمان موعد مقرر فازی، مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی فازی را می‌توان بصورت مسائلی با اهداف سه-گانه فرمول‌بندی نمود، بطوریکه کمینه کردن ماکزیمم زمان تکمیل کارها، بیشینه کردن متوسط شاخص توافق و بیشینه کردن مینیمم شاخص توافق، اهداف مساله را تشکیل می‌دهند. بعد از مشخص ساختن توابع عضویت برای اهداف فازی مساله، از روش فازی بلمن و زاده برای ترکیب آنها استفاده می‌شود. برای حل این مساله زمان‌بندی، با توجه به ویژگی‌های الگوریتم بهینه‌سازی اکسترمال، از این الگوریتم استفاده شده است. الگوریتم اکسترمال پیشنهادی بر روی مجموعه داده آزمایشی۶ × ۶ و ۱۰ × ۱۰ آزمایش شد که الگوریتم پیشنهادی در تمامی آزمایش‌ها به جواب‌های مطلوبی دست پیدا می‌کند و همچنین در مقایسه با الگوریتم تبرید تدریجی بسیار بهتر عمل می‌کند و در مقایسه با الگوریتم ژنتیک نتایجی مشابه حاصل می‌شود. قابل ذکر است به دلیل خاصیت "بهمن‌گونه" الگوریتم اکسترمال، این روش می‌تواند از بهینه محلی فرار کند و حالات بیشتری را بررسی کند و بهترین زمانبندی ممکن را انجام دهد. در انتها برای تحلیل جواب‌ها و همچنین اثبات درستی روش پیشنهادی برای زمانبندی کار کارگاهی فازی از دو روش متفاوت استفاده شده است، اول اینکه با توجه به اصل همگرایی، پایداری و یکنواخت بودن الگوریتم پیشنهادی، با استفاده از رسم منحنی‌های همگرایی، نمایش داده شده است، که بیانگر این مطلب می-باشد که الگوریتم در تکرارهای متفاوت به شکل یکنواخت و پایداری به سمت جواب میل می‌کند که این مورد یکی از دلایل صحت روش پیشنهادی در حل این مساله می‌باشد. سپس دومین روش، استفاده از آزمون آماری t است، با توجه به این نکته که تقریبا باید همه مقادیر برازندگی کلی جواب‌ها در تکرارهای گوناگون بیشتر از میانگین میزان رضایتمندی از برنامه‌زمانی باشد با استفاده از آزمون t ٪۹۵ اثبات شده است، که در واقع به درستی جواب‌های بدست آمده اشاره می‌کند.

۸- مراجع

[۱] M.R.Garey, D.S.Johnson, R.Sethi, "*The Complexity of* Flow shop *and Job shop Scheduling"*. Mathematics of Operations Research ۱, ۱۹۷٦, pp. ۱۱۷-۱۲۹.

[۲] L.Davis, "*Job shop scheduling with genetic algorithms*", Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms, ۱۹۸٥, pp. ۱۳٦±۱٤۰.

[۳] M. Sakawa and R. Kubota, "*Fuzzy programming for multi objective job shop scheduling with fuzzy processing time and fuzzy due date through genetic algorithms*", Eur. J. Oper. Res., vol. ۱۲۰, no. ۲, pp. ۳۹۳–٤۰۷, Jan. ۲۰۰۰.

[٤] P.D. Dominic, S. Kaliyamoorthy, R. A .Murugan,"*Conflict-Based Priority Dispatching Rule and Operation-Based Approaches to Job Shops*", International Journal of Advanced Manufacturing Technology ۲٤, ۲۰۰٤, pp. ۷٦.۸۰

[٥] K.Steinhöfel, A. Albrecht, C.K.Wong, "*Two Simulated Annealing-Based Heuristics for the Job Shop Scheduling Problem*". European Journal of Operational Research ۱۱۸, ۱۹۹۹, pp. ٥۲٤-٥٤۸

[٦] S.Boettcher, A.G.Percus, "*Extremal Optimization: An Evolutionary Local-Search Algorithm*" http://arxiv.org/abs/cs.NE/۰۲۰۹۰۳۰

[۷] M. L. Pinedo. "*Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*",۲۰۰٥ Springer Science Business Media, Inc.

[۸] G.Zäpfel, R.Braune, M.Bogl, "*Met heuristic Search Concepts*", Springer Heidelberg Dordrecht London New York ۲۰۱۰

[۹] I.González-Rodríguez, J.Puente, C.Vela, R.Varela, "*Semantics of Schedules for the Fuzzy Job-Shop Problem*", IEEE Transaction on system, man, and cybernetics- part A: System And Humans, VOL. ۳۸, NO. ۳, MAY ۲۰۰۸.

[۱۰] R. E. Bellman, L. A. Zadeh, "*Decision-making in a fuzzy environment*," Manage. Sci., vol. ۱۷, no. ٤, pp. ۱٤۱–۱٦٤, Dec. ۱۹۷۰.

[۱۱] P.Brucker, "*Scheduling Algorithms*", Universidad Osnabrück Fachbereich Mathematik/Informatik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg ۲۰۰۱, ۲۰۰٤, ۲۰۰۷

[۱۲] Y. X. a. Z. Wang, "*An Improved Genetic Algorithm with Recurrent Search for The Job-Shop Scheduling Problem* ", The ٦th World Congress on Intelligent Control and Automation, © ۲۰۰٦ IEEE.

[۱۳] H.T.Nguyen, E.A.Walker," *A First Course in Fuzzy Logic*", ۲nd ed. London, U.K.: Chapman & Hall, ۲۰۰۰.

[۱٤] P.Fortemps, "*Job shop scheduling with imprecise durations: A fuzzy approach*", IEEE Trans. Fuzzy Syst, vol. ٥, no. ٤, pp. ٥٥۷–٥٦۹, Nov. ۱۹۹۷.

[۱٥] G. Bortolan , R. Degani, "*A review of some methods for ranking fuzzy subsets*", in Readings in Fuzzy Sets for Intelligence Systems, D. Dubois, H. Prade, and R. Yager, Eds. Amsterdam, The Netherlands: Morgan Kaufmann, ۱۹۹۳, pp. ۱٤۹-۱٥۸.

[۱٦] G. Celano, A. Costa, S. Fichera, "*An evolutionary algorithm for pure fuzzy flow shop scheduling problems*", Int. J. Uncertain. Fuzziness Knowl.-Based Syst., vol. ۱۱, no. ٦, pp. ٦٥٥–٦٦۹, Dec. ۲۰۰۳.

[۱۷] S.Boettcher, "*Extremal Optimization: Heuristics via Avalanches*", computers simulation, November/December ۲۰۰۰.

[۱۸] G.Q. Zeng, Y.Z.Lu, W.J.Mao, J.Chu,"*Study on probability distributions for evolution in modified extremal optimization*", Physical A ۳۸۹ (۲۰۱۰) ۱۹۲۲_۱۹۳۰

[۱۹] G.K. Kanji, "۱۰۰ *Statistical test* ", SAGE Publications Ltd, Third edition published ۲۰۰٦