مدیریت تولید و عملیات، دوره چهارم، پیاپی(٦)، شماره (١)، بهار و تابستان ١٣٩٢
دریافت: ٩٠/٢/٢٧ پذیرش: ٩١/٧/٢٥
صص: ٢٠- ١

ارائه روش‌های ابتکاری جدید برای زمان‌بندی تعمیرات پیشگیرانه

مجید اسماعیلیان[1*] ، احمد جعفر نژاد[2]، سید احسان جبلی[3]
١-استادیار دانشکده علوم اداری و اقتصاد، گروه مدیریت دانشگاه اصفهان
٢-استاد مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران
٣-کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

چکیده

هدف از زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه انجام مجموعه‌ای از کارهایPM به منظور کاهش توقفات و حداکثر کردن قابلیت اطمینان تجهیزات است. در مقاله گوپالاک و همکاران(١٩٩٧) یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح و چهار روش ابتکاری برای حل مساله زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه توسعه داده شده است. در مدل ریاضی و روش‌های ابتکاری ارائه شده، فرض بر این است که ترکیب کارگران و حالات ممکن انجام کارها، مشخص است. تعیین ترکیب کارگران مشکل و زمان‌بر بوده و حالات ممکن به شکل نمایی افزایش می‌یابد. در این پژوهش، یک روش ابتکاری برای تعیین تمامی ترکیبات ممکن انجام هر کار توسط کارگران ارائه شده است. علاوه بر این، چهار روش ابتکاری برای زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه در حالت وجود نیروی کار چند مهارته بررسی شده که بدون نیاز به تعیین ترکیب کارگران یک جواب موجه نزدیک به بهینه برای مساله زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه ارائه می‌نمایند. با طراحی مسائل مختلف (٨١ مساله) و ارائه یک مدل شبیه سازی، کیفیت جواب‌های به دست آمده از روش‌های ابتکاری جدید با روش‌های ابتکاری ارائه شده توسط گوپالاک و همکاران(١٩٩٧) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد روشهای ابتکاری پیشنهادی کاراتر بوده و جواب‌های نزدیکتری به جواب بهینه ارائه نموده‌اند. میانگین کیفیت جواب(SQ) در الگوریتم‌های پیشنهادی ١,٨٦٪ و در الگوریتم‌های گوپالاک و همکاران ٨,٣٢٪ است. الگوریتم‌های جدید در مدت زمان حل نیز برتری خوبی به الگوریتم‌های قدیمی دارند. میانگین زمان حل مسائل توسط الگوریتم‌های پیشنهادی ٠,٧٨ ثانیه و توسط الگوریتم‌های گوپالاک و همکاران ٦,٤٣ ثانیه است.

واژه‌های کلیدی: زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه (PM)، روش‌های ابتکاری، نگهداری و تعمیرات، نیروی کار چند مهارته، تعمیرات پیشگیرانه

* نویسنده مسؤول: Majid_Esmaelian@yahoo.com , M.Esmaelian@ase.ui.ac.ir

۱- مقدمه

اهمیت طرح ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) به عنوان بخشی از استراتژی شرکت در سودآوری را نمی‌توان نادیده گرفت. تعمیرات پیشگیرانه یک فعالیت کلیدی هر سازمان است. برای کاهش و حداقل کردن نرخ خرابی و در نتیجه، حفظ قابلیت سودآوری و توان رقابتی در بازارهای جهانی به تعمیرات پیشگیرانه نیاز خواهد بود،(پیرایر و همکاران، ۲۰۰٦b).

یک مساله زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه (PM) را در نظر بگیرید که در آن مجموعه ای از کارهای نت با نیروی کار محدود وجود دارد. در ابتدای هر سال یا هر ماه، زمانبندی کارها و وظایف نگهداری و تعمیرات معمولاً توسط مدیر تولید بر مبنای داده‌ها و اطلاعات حاصل از عملکرد گذشته انجام می گیرد، هر چند به خاطر ماهیت پویای مدیریت نگهداری و تعمیرات(نت)، مانند تغییر در اولویت کارها و یا تعداد نیروی انسانی ماهر، این برنامه زمانبندی ممکن است تغییر نماید. هر کار (وظیفه) در تعمیرات پیشگیرانه شامل چندین فعالیت و هر فعالیت نیازمند، چندین مهارت گوناگون است. برای انجام این کارها لازم است که کارمندان تعمیرات از مهارت‌های مورد نیاز برخوردار باشتد. کارمندان تعمیرات می‌توانند تک مهارته و یا چند مهارته باشند. کارها(وظایف) تعمیرات پیشگیرانه دارای اولویت‌ها و ضرایب اهمیت متفاوتی بوده، و هدف مدیریت نگهداری و تعمیرات این است که با نیروی انسانی موجود، بیشترین تعداد کارها را انجام دهد. با این حال، به علت محدود بود،ن نیروی انسانی و زمان در دسترس، برخی از کارها را نمی توان انجام داد. کارهای زمانبندی نشده، به دوره‌های برنامه‌ریزی آتی منتقل می‌گردند. هدف از زمانبندی وظایف و فعالیت‌های تعمیرات پیشگیرانه، تخصیص منابع و نیروی انسانی ماهر به کارها و فعالیت‌های PM است؛ به گونه‌ای که بیشترین تعداد کار در یک دوره زمانی مشخص(دوره برنامه ریزی) انجام گردد (گوپالاک ریشنان و همکاران، ۱۹۹۷. گوپالاک ریشنان و همکاران، ۲۰۰۱).

۲- ادبیات تحقیق

تحقیقات انجام شده در زمینه تعمیرات پیشگیرانه را می‌توان به مدل‌های بهینه سازی تعمیرات پیشگیرانه و تکنیک‌ها و روش‌های حل مدل‌های تعمیرات پیشگیرانه تقسیم کرد. مدل‌های بهینه‌سازی، شامل مدل‌های تخصیص منابع، کنترل موجودی، سیستم پشتیبان تصمیم و سیستم‌های اطلاعاتی نگهداری وتعمیرات هستند. در مدل‌های بهینه‌سازی PM از روش‌های برنامه ریزی خطی/غیر خطی، برنامه ریزی عدد صحیح، برنامه ریزی پویا، تئوری تصمیم، فرایند های مارکوفی و شبیه سازی استفاده شده است. در حل مسائل زمانبندی PM از روش‌های ابتکاری، هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی استفاده شده است. مدل‌های بهینه سازی نگهداری و تعمیرات بسیاری در دهه ۱۹٦۰ به بعد ارائه گردید. این مدل‌ها از معیارهای متفاوتی برای بهینه سازی فعالیت‌های نت استفاده می‌نمایند. پایرسکالا و ولکر، این مدل‌ها را به چهارگروه مدل‌های بازرسی[۱] ، تعویض[۲]، تعمیر[۳] و خرید و تدارکات[٤] تفکیک

می‌نمایند(سورتراکول و همکاران،۲۰۰۵). وانگ (۲۰۰۲) خط مشی نگهداری و تعمیرات را به خط‌مشی جایگزینی بر مبنای عمر دستگاه‌ها و تجهیزات [۵]، خط‌مشی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه[۶] و خط‌مشی تعمیرات خرابی و شکست[۷] تفکیک می‌کند(پیرایر و همکاران،۲۰۰٦a).

۲-۱- تکنیک‌های حل مدل‌های زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به پیچیدگی مسائل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اندازه آنها، جواب بهینه را نمی‌توان با استفاده از روش‌های محاسباتی فعلی به راحتی به دست آورد؛ حتی با رشد و پیشرفت تکنولوژی اطلاعات و تکنیک‌های مدل سازی ریاضی پیشرفته و پیچیده، زمان محاسباتی و استراتژی‌های حل سریع هنوز باید مورد بازنگری شده، بهبود یابند. به منظور حل سریع مسائل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و رسیدن به یک جواب نزدیک به بهینه، متدولوژی حل را می‌توان به شکل دو گروه الگوریتم‌های ابتکاری[۸] و روش‌های جستجو بر مبنای هوش مصنوعی[۹] از یکدیگر تفکیک کرد.

۲-۱-۱- الگوریتم‌های ابتکاری

با توجه به زمان زیاد مورد نیاز برای یافتن جواب بهینه، در مسائل نگهداری و تعمیرات پیشگویانه، سعی در یافتن یک جواب نزدیک به بهینه به منظور کاهش زمان محاسبات تا حد ممکن است. در برخی از مسائل نگهداری و تعمیرات مانند رویدادهای طبیعی و حوادث غیر مترقبه، زمان از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این موارد، زمان کافی برای یافتن جواب بهینه وجود ندارد، بنابراین، بهترین استراتژی یافتن یک جواب نزدیک به بهینه، ولی سریع برای مسائل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌باشد.چانگ و همکاران (۱۹۹۹)یک الگوریتم ابتکاری برای حداقل کردن سطح نیروی کار نگهداری و تعمیرات ارائه کردند(چانگ و همکاران،۱۹۹۹). سایر روش‌های ابتکاری حل مسائل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در مقاله، گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷)، کیو و همکاران (۱۹۹۹)، گریگوری وهمکاران (۲۰۰۵)، ماروتی و همکاران (۲۰۰۵)، بود، ائی و همکاران (۲۰۰۵) و وانگ (۲۰۱۰) ارائه شده است.

۲-۱-۲- هوش مصنوعی

هوش مصنوعی به روش‌های مختلفی در مسائل گوناگونی از نگهداری و تعمیرات مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی عبارتند از: الگوریتم ژنتیک[۱۰] ، جستجو ممنوع[۱۱] ، سرد شدن تدریجی[۱۲] و شبکه‌های عصبی[۱۳] .

شیور وهمکاران (۱۹۹۵) با ارائه مثالی، کاربرد شبکه‌های عصبی را در پیش بینی نیاز موتورهای هواپیما به بازرسی اجزاء نشان دادند.

آهیر وهمکاران (۲۰۰۰) از روش‌های جستجوی تکاملی (الگوریتم ژنتیک) برای حل مسائل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با محدودیت نیروی کار استفاده کردند. گوپالاک وهمکاران (۲۰۰۱) از روش جستجو ممنوع، برای حل مساله تعمیرات پیشگویانه با محدودیت نیروی کار چند مهارته استفاده کردند و نتایج حاصل از الگوریتم جستجو ممنوع را با چهار

روش ابتکاری ساده که توسط نویسندگان مقاله توسعه داده شده بود، مقایسه کردند.

کاوری و همکاران(۲۰۰۱) در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی زمانبندی کارهای نگهداری و تعمیرات ماشین آلات خط تولید را در یک خط تولید تک محصولی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند.

سمروت و همکاران (۲۰۰۵) از الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچگان[١٤](ACO) برای حداقل کردن هزینه های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در یک سیستم سری- موازی استفاده کردند.

سورترکول وهمکاران (۲۰۰۵) از الگوریتم ژنتیک برای یکپارچه کردن برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و زمانبندی تولید برای یک ماشین استفاده کردند.به رغم ارتباط نزدیک و تنگاتنگ برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه و زمانبندی تولید، این دو درمسائل واقعی تولید به صورت مجزا مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

سیاراپیکا (۲۰۰٦) از شبکه‌های عصبی مصنوعی[١٥] برای پیش‌بینی نرخ خرابی لاستیک‌های هواپیما استفاده کردند. محققان از شبکه عصبی پرسپترون دو لایه با قانون یادگیری پس‌انتشار خطا[١٦] در تحقیق خود استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نرخ خرابی پیش بینی با استفاده از شبکه‌های عصبی نسبت به نرخ خرابی پیش بینی شده با استفاده از مدل وایبول به داده‌های واقعی نزدیکتر بوده، از درصد خطای پایین‌تری برخوردار است. لاپا و همکاران (۲۰۰٦) متدولوژی جدیدی برای ارزیابی خط مشی‌های تعمیرات پیشگیرانه بر مبنای مدل هزینه- قابلیت اطمینان[١٧] ارائه کردند. این مدل امکان استفاده از فواصل زمانی انعطاف‌پذیر در دوره برنامه‌ریزی تعمیرات را فراهم می کند.

کوان و همکاران(۲۰۰۷)از الگوریتم‌های تکاملی برای حل مساله برنامه‌ریزی چند هدفه استفاده کردند. در مدل فوق برای کاهش زمان بیکاری و بلا استفاده کارمندان، نیروی کار باید کاهش یافته، یا تا حدی افزایش یابد که بیشترین تعداد تعمیرات در هر ساعت انجام گیرد. روش‌های مرتبط با کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت نگهداری و تعمیرات در مقاله بلاچلیگر (۲۰۰٤)، عبدالوهاب و همکاران (۲۰۰٤)، بانسال (۲۰۰۵)، پیرایر و همکاران (۲۰۰٦)، نادری (۲۰۱۰) و پیریا (۲۰۱۰) ارائه شده است.

۲-۲- مدل‌های ارائه شده در زمینه زمانبندی PM

با توجه به اینکه در این مقاله در صدد زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه هستیم، مطالعات انجام شده در حوزه مدل‌های زمانبندی و تخصیص نیروی انسانی را بیشتر تشریح می‌کنیم. مسائل زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه، از جمله مسائل NP[١٨] بوده، پیچیدگی این مساله ناشی از محدودیت نیروی کار ماهر در دسترس و محدودیت طول دوره زمانبندی است. مسائل NP به آن دسته از مسائل گفته می‌شود، که زمان مورد نیاز برای حل آنها، با استفاده از هر الگوریتم(روش حل) شناخته شده‌ای با افزایش اندازه مساله به شدت افزایش می‌یابد. مسائلی چون، کوله‌پشتی، فروشنده دوره گرد، زمانبندی، برنامه

ریزی صفر و یک و برنامه ریزی خطی عدد صحیح، از جمله مسائل NP هستند(اهیر و همکاران،۲۰۰۰).

روبرت و همکاران (۱۹۸۳) یک مدل ریاضی برای زمانبندی کارمندان نگهداری و تعمیرات کارخانه ارائه کردند. فرض اساسی مدل فوق، تک مهارته بود،ن کارمندان نگهداری و تعمیرات است.

گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) یک مدل رگرسیون لجستیک برای تعیین اولویت فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و سپس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای زمانبندی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بر مبنای اولویت‌های محاسبه شده ارائه کردند. در این مدل، فرض بر این است که طول دوره زمانبندی از قبل مشخص است. در این مدل هدف، حداکثر کردن کل تعداد کارهای زمانبندی شده با بیشترین اولویت است.

رویز و همکاران (۲۰۰۷) روش‌ها و تکنیک‌هایی برای بررسی تاثیر خط‌مشی‌های مختلف تعمیرات پیشگیرانه در مسائل زمانبندی کارگاهی ارائه کردند. در این مقاله، هدف خط‌مشیPM حداکثرکردن قابلیت دسترسی و یا حفظ حداقل سطح قابلیت اطمینان مورد نظر برای ماشین آلات و تجهیزات است. نویین وباگاجویچ (۲۰۰۸) یک روش جدیدی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و میزان منابع مورد نیاز برای انجام نگهداری و تعمیرات ارائه کردند. در این مقاله، یک مدل بهینه سازی شبیه‌سازی[19] به منظور ارزیابی هزینه مورد انتظار انجام و زیان اقتصادی مورد انتظار عدم انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه توسعه داده شده است. محققان از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده کردند. در مقاله الویی و همکاران (۲۰۰۸)، زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه و زمانبندی n کار بر روی دو ماشین به طور همزمان بررسی شده است. در بسیاری از مقالات مربوط به زمانبندی دو ماشین، فرض بر این است که ماشین‌ها در طول دوره برنامه‌ریزی همواره در دسترس هستند، در حالی که در مسائل واقعی به علل مختلف و از جمله اجرای تعمیرات پیشگیرانه ممکن است ماشین‌ها در دسترس و آماده به کار نباشند. محققان اثبات کردند که مساله فوق جزو مسائل NP است.

زو و همکاران (۲۰۰۹) از روش برنامه‌ریزی پویا برای زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه بر مبنای موقعیت[20] در یک سیستم سری چند بخشی استفاده کردند. در یک سیستم سری توقف یک جزء برای انجام تعمیرات پیشگیرانه، به توقف کل سیستم می انجامد. در این شرایط می‌توان تعمیرات پیشگیرانه بر مبنای موقعیت را برای سایر اجزای سیستم انجام داد.

در مقاله نادری و همکاران (۲۰۱۰) تعمیرات پیشگیرانه دوره‌ای (بر مبنای زمان) در مسائل زمانبندی کارگاهی بررسی شده است. در این پژوهش، از دو روش متاهیورستیک، شامل الگوریتم ژنتیک والگوریتم ایمنی مصنوعی[21] استفاده و کیفیت جواب روش‌های گوناگون با یکدیگر مقایسه شده است. وانگ و همکاران (۲۰۱۰) روش ابتکاری مؤثری برای مساله زمانبندی سیستم تولید کارگاهی انعطاف پذیر با در نظر گرفتن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات ارائه کردند. در مدل‌های قبلی زمانبندی

سیستم تولید کارگاهی، فرض بر این است که ماشین‌آلات به شکل پیوسته و مداوم در دسترس و آماده به کار هستند، ولی در مسائل عملی و واقعی به علت انجام تعمیرات پیشگیرانه (Pm) ماشین آلات همواره در دسترس و آماده به کار نیستند. در پژوهش فوق محدودیت قابلیت دسترسی ماشین‌آلات و محدودیت میزان منابع و کارمندان تعمیرات در مساله زمانبندی کارگاهی در نظر گرفته شده است.

پیریا و همکاران (۲۰۱۰) روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان (PSO)[۲۲] (بهینه‌سازی ازدحام ذرات) برای بهینه‌سازی زمانبندی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه غیر دوره‌ای (غیر پریودیک) ارائه کردند. مدل احتمالی ارائه شده، بر قابلیت اطمینان و هزینه متمرکز بوده، و به شکلی توسعه یافته است که وجود فواصل زمانی انعطاف پذیر در بین تعمیرات پیشگیرانه را امکان‌پذیر می‌سازد. ما و همکاران (۲۰۱۰) در یک مقاله مروری، مسائل مختلف زمانبندی تولید در حالت قطعی و با محدودیت قابلیت دسترسی ماشین‌آلات را که تحت تاثیر تعمیرات پیشگیرانه هستند را مطالعه و بررسی کردند.

۳- مدل زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه

فرض کنید، چندین فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) با درجه اهمیت و اولویت متفاوت وجود داشته باشد و هر فعالیت برای انجام به مهارت‌های مختلف نیاز دارد. یک نمونه از مسائل زمانبندی PM در مقاله گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) ارائه شده است، در این مساله، شش کار تعمیرات پیشگیرانه با درجه اهمیت و اولویت متفاوت وجود داشته؛ به طوری که هر کار برای انجام به سه مهارت مختلف (مکانیکی، هیدرولیکی و الکتریکی) نیاز دارد. ۳ نفرکارمند مامور انجام این شش کار هستند. و هر فرد نیز دارای دو مهارت است که در جدول ۳-۱ ارائه شده است

جدول ۳-۱- جدول مهارت و ساعات در دسترس افراد

زمان کار در دسترس	مهارت ۳	مهارت ۲	مهارت ۱	
۱۸ساعت		*	*	فرد ۱
۲۲ساعت	*	*		فرد ۲
۲٤ساعت	*		*	فرد ۳

اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها، ساعات کار و مهارت‌های مورد نیاز هر یک از آنها در جدول ۳-۲ ارائه شده است.

جدول۳-۲- اطلاعات مربوط به ساعات کار و مهارت‌های مورد نیاز هر کار

کار	A	B	C	D	E	F
مهارت ۱	۲	۰	۰	٦	۰	۱۲
مهارت ۲	۱۰	۰	٦	۵	۸	۰
مهارت ۳	۰	۸	۸	۷	۰	۸
درجه اولویت	۸۸	۲۲۲	۲۳۲	۱۲۹	٦۹	۱۱۸

در مدل ارائه شده توسط گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) فرض بر این است که تمام ترکیبات ممکن انجام کارها مشخص است. ترکیب کارگران به ازاء هر کار PM در جدول ۳-۳ ارائه شده است

جدول ۳-۳- تمام ترکیبات ممکن انجام کارهای PM

کار	ترکیب	فرد ۱	فرد ۲	فرد ۳	فعالیت	ترکیب	فرد ۱	فرد ۲	فرد ۳
A	۱	۱۲	۰	۰	D	۱	۱۱	۷	۰
	۲	۲	۱۰	۰		۲	۱۱	۰	۷
	۳	۱۰	۰	۲		۳	٦	۱۲	۰
	٤	۰	۱۰	۲		٤	٦	۵	۷
B	۱	۰	۸	۰		۵	۵	۷	٦
	۲	۰	۰	۸		٦	۵	۰	۱۳
C	۱	٦	۸	۰		۷	۰	۱۲	٦
	۲	٦	۰	۸		۸	۰	۵	۱۳
	۳	۰	۱٤	۰	E	۱	۸	۰	۰
	٤	۰	٦	۸		۲	۰	۸	۰
F	۱	۱۲	۸	۰					
	۲	۱۲	۰	۸					
	۳	۰	۸	۱۲					
	٤	۰	۰	۲۰					

مدل ارائه شده توسط گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) به شرح مدل ۳-۱ است:

$$Max \sum_{m \in K_i} \sum_{i \in I} p_i y_{im} \qquad ۱-۳$$

$$s.t$$

$$\sum_{m \in K_i} y_{im} \le 1 \qquad \forall\, i \in I$$

$$\sum_{m \in K_i} \sum_{i \in I} a_{ijm} y_{im} \le T_j \qquad \forall\, j \in C$$

$$y_{im} = 0,1 \qquad \forall\, i \in I, m \in K_i$$

تابع هدف، حداکثر کردن تعداد کارهای زمانبندی شده با بیشترین درجه اولویت است. محدودیت اول، تضمین می‌کند که حداکثر یک ترکیب از کارگران برای انجام فعالیت iام انتخاب شود. محدودیت دوم تضمین می‌کند که کارهای تخصیص یافته به هر فرد برابر با کل زمان در دسترس وی بوده، و محدودیت سوم، صفر و یک بود،ن متغیرهای تصمیم است.

متغیرها و پارامترهای مدل ۳-۱ به شکل زیر تعریف می‌شوند:

p_i = درجه اولویت کارiام

T_j = کل زمان در دسترس فرد jام

a_{ijm} = زمان صرف شده توسط فرد jام برای انجام کار iام، اگر این فعالیت توسط ترکیب mام انجام گردد.

i= شاخص کارها

j= شاخص نیروی کار(فرد انجام دهنده)

m= شاخص ترکیب مهارت‌ها

I= کل کارهایPM

C= مجموعه نیروی کار تک مهارته یا چند مهارته

K_i = مجموعه تمامی ترکیبات ممکن برای انجام فعالیت iام

y_{im} = متغیر تصمیم از نوع صفر و یک است. اگر کار iام توسط ترکیبmام $(m \in K_i)$انجام شود، $y_{im}=1$ و اگر کارiام توسط ترکیبmام $(m \in K_i)$انجام نشود، $y_{im}=0$ است.

در مدل گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) فرض بر این است که ترکیب کارگران پیش از مدل سازی و حل مساله زمان بندی PM مشخص است. در مسائل عملی، تعیین ترکیب کارگران مشکل و وقت‌گیر بوده، و محققان هیچ روش عملی برای محاسبه تمامی ترکیب کارگران ارائه نکرده‌اند. اساساً، هر مساله زمانبندی PM را می‌توان با فهرست کردن ترکیب کارگران و سپس ارزیابی هر ترکیب با توجه به یک تابع هدف و انتخاب بهترین ترکیب حل کرد. واضح است که این روش به خاطر نیاز به محاسبه تمامی ترکیب کارگران، ناکارا و وقت‌گیر است. هر چند هر مساله زمانبندیPM را می‌توان با استفاده از مدل۳-۱ حل کرد، ولی در مسائل واقعی و عملی، استفاده از این روش امکان پذیر نیست. در مسائل زمانبندی PM، تعداد ترکیبات ممکن و در نتیجه، تعداد متغیرها در مدل ریاضی گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) به شکل نمایی افزایش پیدا می‌کنند. این امر به افزایش زمان حل مساله منجر شده، بهترین نرم افزاهای موجود برای حل مدل‌های عدد صحیح نیز قادر به یافتن جواب بهینه مدل در مدت زمان معقول نیستند. برای رفع مشکل کارایی محاسباتی مدل گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) تحقیقاتی توسط اَهیر وهمکاران(۲۰۰۰) و گوپالاک وهمکاران (۲۰۰۱) انجام شده است.

٤- روش‌های ابتکاری گوپالاک برای حل مساله زمانبندی PM

گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) چهار روش ابتکاری برای رفع مشکل کارایی محاسباتی مساله زمانبندی PM با استفاده از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح فوق (مدل ۳-۱) توسعه دادند. این چهار روش ابتکاری بر اساس شیوه مرتب سازی فعالیت‌ها و نحوه تخصیص ترکیب کارگران با یکدیگر متفاوت هستند. محققان به شکل ساده از معیار درجه اولویت[۲۳] هر فعالیت، برای تخصیص کارمندان به کارهای PM استفاده کردند. به هر حال، چهار روش ابتکاری ارائه شده توسط گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) نمی تواند مسائل زمانبندی PM را به شکل کارایی حل نماید زیرا آنها تمامی ترکیبات ممکن کارگران را قبل از به کارگیری روش‌های ابتکاری تعیین کرده، این امر زمان محاسباتی هر روش ابتکاری را در مسائل بزرگ افزایش می‌دهد.

٤-۱- روش ابتکاری اول (H-Old1)

در این روش ابتکاری، ابتدا کارهای PM بر اساس درجه اهمیت و اولویت آنها (P_i) به شکل نزولی مرتب می‌شوند. در این روش هر کار PM، به اولین ترکیب موجه کارگران که به شکل زیر تعریف می‌شود، تخصیص می‌یابد. ترکیب m برای کارiام یک ترکیب موجه است، اگر زمان در دسترس هر کارگر در ترکیب m بزرگتر یا مساوی با زمان مورد نیاز مهارت‌های لازم برای انجام کار باشد. زمانی که یک ترکیب دارای بیش از یک کارگر است، فرض بر این است که هر مهارت توسط یک کارگر انجام می‌شود. به عبارت دیگر، ساعات مورد نیاز برای انجام هر مهارت از یک کار بین دو نفر تقسیم نمی‌شود. برای مثال، فرض کنید که کارiام نیازمند ۱۰ ساعت مهارت یک و پنج ساعت مهارت دو بوده، و ترکیب mام متشکل از کارگر یک با مهارت‌های یک وسه (۱۵ ساعت در دسترس) و کارگر دو با مهارت‌های یک و

دو (۱۰ ساعت در دسترس) باشد. ترکیب mام یک ترکیب موجه است، زیرا کارگر اول می‌تواند ۱۰ ساعت از مهارت یک و کارگر دوم می‌تواند پنج ساعت از مهارت دو را انجام دهد. در ترکیب mام نمی‌توان پنج ساعت از مهارت یک را به کارگر اول و پنج ساعت دیگر را به کارگر دوم تخصیص داد. جزئیات و مراحل روش ابتکاری اول به شرح زیر است.

مرحله اول: مرتب سازی کارها و وظایف PM

کارهای PM را بر اساس درجه اهمیت و اولویت آنها (P_i)، به شکل نزولی مرتب کرده و مجموعه I' را تشکیل می‌دهیم. متغیر اثر بخشی PM، (PME)، را مساوی صفر و i را مساوی ۱ قرار می‌دهیم. $(i=1, PME=0)$

مرحله دوم: انتخاب کار(وظیفه)

کار iام را از مجموعه I' انتخاب می‌کنیم. ترکیبات موجه فعالیت iام را با مجموعه k_i نشان می‌دهیم. اگر $k_i = \phi$ باشد، به مرحله ٤ و اگر $k_i \neq \phi$ باشد به مرحله ۳ می‌رویم.

مرحله سوم: تخصیص ترکیب کارگران

کار iام با استفاده از اولین ترکیب موجه از مجموعه k_i زمانبندی شده و انجام می‌شود. سپس ساعات کار در دسترس کارگران، تعدیل و $PME = PME + P_i$ قرار داده می‌شود.

مرحله چهارم: به روز رسانی متغیرها

اگر i برابر با کل تعداد کارهای موجود در مجموعه I' باشد، توقف کرده، در غیر این صورت $i = i+1$ قرار داده شده، به مرحله دوم می‌رویم.

٤-۲- روش ابتکاری دوم (H-Old2)

روش‌های ابتکاری اول و دوم تنها در شیوه مرتب سازی کارهای PM و تشکیل مجموعه I' با یکدیگر تفاوت دارند. در روش ابتکاری دوم، کارهای PM بر اساس شاخص $\frac{p_i}{TT_i}$ به شکل نزولی مرتب می‌شوند. TT_i،کل زمان مورد نیاز برای انجام کار iام است. سایر مراحل روش ابتکاری دوم، مانند روش اول است.

٤-۳- روش ابتکاری سوم (H-Old3)

روش ابتکاری سوم در شیوه تخصیص ترکیب کارگران (مرحله ۳) با روش ابتکاری اول تفاوت دارد. در روش ابتکاری سوم، به جای تخصیص کارهای انتخابی به اولین ترکیب موجه، از شاخص مصرف[٢٤](CI) در فرایند تخصیص ترکیب کارگران استفاده می‌کنیم. به ازای کارتعمیراتی iام و برای هر ترکیب موجه $(m \in k_i)$، شاخص باقی مانده منابع[٢٥] (RRI) را به شکل زیر محاسبه می‌نمایم:

$$RRI_{im} = \sum_j \left(1 - \frac{\mathrm{Re}\, q_{ijm}}{Avail_j}\right) \qquad ١-٤$$

که :

i: اندیس کارهای PM

j: اندیس کارگران

m : اندیس ترکیب‌های موجه کارiام $(m \in k_i)$

$\mathrm{Re}\, q_{ijm}$:تعداد ساعاتی که کارگرjام در ترکیب موجه mام از کارiام، باید صرف کند.

$Avail_j$: مقدار ساعات در دسترس کارگرjام

عبارت $\left(1-\frac{\mathrm{Re}\, q_{ijm}}{Avail_j}\right)$ نسبت باقی مانده کارگر jام را محاسبه کند، اگر کارiام توسط ترکیب mام انجام شود. بنابراین، شاخص RRI_{im}، نسبت ظرفیت باقی مانده تمامی کارگران را در صورت انجام کارiام توسط ترکیب mام، محاسبه می‌نماید. اگر بیشتر از یک ترکیب برای انجام فعالیت iام وجود داشته باشد، مطلوب است که پس از تخصیص کارiام، بیشترین مقدار ممکن از منابع باقی بماند. بنابراین، شاخص مصرف فعالیت iام (CI_i) به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$CI_i = \underset{m\in k_i}{Max}\left(RRI_{im}\right) \qquad ۲-۴$$

اگر $k_i = \phi$ باشد،امکان انجام کار iام در دوره جاری نبوده، کار iام در دوره زمانی آینده، زمانبندی می‌شود.

٤-٤- روش ابتکاری چهارم (H-Old4)

روش‌های ابتکاری چهارم، مشابه با روش ابتکاری سوم است؛ با این تفاوت که در مرحله اول روش ابتکاری چهارم، کارهای PM بر اساس شاخص $\frac{p_i}{TT_i}$ به شکل نزولی مرتب می‌شوند. به عبارت دیگر، این دو روش در شیوه تشکیل مجموعه I' با یکدیگر تفاوت دارند. TT_i، کل زمان مورد نیاز برای انجام کار iام است. سایر مراحل روش ابتکاری چهارم، مانند روش سوم است.

٥- الگوریتم‌های ابتکاری پیشنهادی برای حل مساله زمانبندی PM

مدل ریاضی و روش‌های ابتکاری ارائه شده توسط گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) نمی‌توانند مساله زمانبندی تعمیرات پیشگرانه را به شکل کارا و سریع حل کرده و نیازمند صرف زمان زیادی برای حل مساله هستند، زیرا تعداد ترکیبات ممکن (متغیرهای تصمیم) با افزایش ابعاد مساله، تعداد کارها،کارگران و مهارت‌ها به شکل نمایی افزایش می‌یابند. در مدل ریاضی و روش‌های ابتکاری ارائه شده توسط گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷)، ابتدا باید تمامی ترکیبات ممکن کارگران را محاسبه کرد و تعداد متغیر های تصمیم برابر با تعداد ترکیب کارگران است. در این پژوهش، چهار روش ابتکاری برای حل مساله زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه ارائه شده است که در ادامه به تشریح هر یک خواهیم پرداخت.

٥-١- روش ابتکاری اول (H-New1)

مرحله اول : مرتب سازی کارها

تمامی کارها (i=1,ه, n) را بر اساس درجه اهمیت (اولویت) آنها (P_i) به صورت نزولی مرتب کنید و مجموعه I' را تشکیل دهید. متغیر اثر بخشی تعمیرات پیشگیرانه (PME) را مساوی صفر و i را مساوی ۱ قرار دهید. $(i=1; PME=0)$

مرحله دوم : مقایسه کل زمان مورد نیاز هر کار با کل زمان در دسترس

کار iام از مجموعه I' را انتخاب و کل زمان مورد نیاز کار iام[۲٦] (TT_i) را با کل زمان موجود (باقی مانده) از تمامی مهارت‌ها (TC) مقایسه کنید. اگر $TT_i \le TC$ باشد، به مرحله سوم و در غیر این صورت به مرحله چهارم می‌رویم.

مرحله سوم: مقایسه زمان مورد نیاز هر مهارت(فعالیت)

زمان مورد نیاز برای انجام هر مهارت (فعالیت) از کار PM را با زمان در دسترس هر فرد $(Avail_j)$ مقایسه کنید. ازمیان افرادی که دارای زمان در دسترس کافی برای انجام آن مهارت(فعالیت) هستند، مهارت مورد نظر را به اولین فرد تخصیص می‌دهیم. ساعات کار در دسترس کارگران را تعدیل کرده، این فرایند را برای سایر مهارت‌ها (فعالیت‌ها) تکرار نموده، در پایان به مرحله چهارم می‌رویم.

مرحله ٤ : به روز رسانی متغیرها

مقدار PME را برابر با $PME = PME + P_i$ قرار داده، اگر i برابر با کل فعالیت‌های موجود در مجموعه I' باشد توقف کنید، در غیر این صورت i رابه i+1 تغییر دهید $(i = i+1)$ و به مرحله دوم بروید.

۵-۲- روش ابتکاری دوم (H-New2)

تنها تفاوت موجود بین روش ابتکاری اول و دوم در شیوه مرتب سازی کارها(وظایف) PM است. در روش دوم، کارها (وظایف) PM براساس معیار $\left(P_i / TT_i\right)$ به شکل نزولی مرتب می شوند. (TT_i)کل زمان مورد نیاز کارiام است. سایر مراحل روش ابتکاری دوم مانند روش ابتکاری اول است.

۵-۳- روش ابتکاری سوم (H-New3)

مرحله اول : مرتب سازی کارها

تمامی کارها $(i = 1,\ldots,n)$ را بر اساس درجه اهمیت (اولویت) آنها (P_i)به صورت نزولی مرتب کنید و مجموعه I' را تشکیل دهید. متغیر اثر بخشی تعمیرات پیشگیرانه (PME) را مساوی صفر و i را مساوی ۱ قرار دهید. $(i = 1; PME = 0)$

مرحله دوم : مقایسه کل زمان مورد نیاز هر کار با کل زمان در دسترس

کار iام از مجموعه I' را انتخاب و کل زمان مورد نیاز کار iام[۲۷] (TT_i) را با کل زمان موجود (باقی مانده) از تمامی مهارت‌ها (TC) مقایسه کنید. اگر $TT_i \le TC$ باشد، به مرحله سوم و در غیر این صورت به مرحله چهارم می‌رویم.

مرحله سوم : مقایسه زمان مورد نیاز هر مهارت(فعالیت)

زمان مورد نیاز برای انجام هر مهارت از کار (فعالیت) را با زمان در دسترس هر فرد $(Avail_j)$ مقایسه کنید. از میان افرادی که دارای زمان در دسترس کافی برای انجام مهارت(فعالیت) هستند، مهارت مورد نظر را به فردی تخصیص می‌دهیم که دارای بیشترین زمان در دسترس باشد. $(Max(Avail_j))$. سپس ساعات کار در دسترس کارگران را تعدیل و این فرایند را برای سایر مهارت‌ها (فعالیت‌ها) تکرار می‌کنیم. پس از اتمام مهارت‌ها به مرحله چهار می‌رویم.

مرحله ٤ : به روز رسانی متغیرها

مقدار PME را برابر با $PME = PME + P_i$ قرار داده و اگر i برابر با کل کارهای موجود در مجموعه I' باشد توقف کنید، در غیر ای نصورت i را به i+1 تغیر دهید $(i = i+1)$و به مرحله دوم بروید.

۵-٤- روش ابتکاری چهارم (H-New4)

تنها تفاوت بین روش ابتکاری سوم و چهارم در شیوه مرتب سازی کارها (وظایف) PM است. در روش

ابتکاری چهارم کارهای PM براساس معیار $\left(P_i/TT_i\right)$ به شکل نزولی مرتب می شوند. TT_i، کل زمان مورد نیاز کار iام است. سایر مراحل دقیقاً مشابه با روش ابتکاری سوم است.

٦- روش ابتکاری تعیین ترکیب کارگران

مساله ترکیب کارگران، تعیین و محاسبه تمامی ترکیبات ممکن تخصیص نیروی کار چند مهارته برای تکمیل و انجام یک کار پیشگیرانه است. در حقیقت، تعیین تمامی ترکیب کارگران کاری مشکل و وقت گیر است، زیرا تعداد حالات ممکن با افزایش تعداد مهارت‌ها و تعداد کارها به شکل نمایی افزایش می‌یابند. در مدل ارائه شده توسط گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷)، فرض براین است که تمامی ترکیبات ممکن انجام کارها از قبل مشخص است. تاکنون هیچ روش کارا و مؤثری برای حل مساله تعیین ترکیب کارگران ارائه نشده است، در حالی که تعیین ترکیب کارگران یکی از مهمترین و مشکل‌ترین مراحل در مساله زمانبندی تعیمرات پیشگیرانه است. در این بخش یک روش ابتکاری کارآ برای حل مساله تعیین ترکیب کارگران ارائه می‌گردد. مراحل این روش ابتکاری عبارتند از:

مرحله اول: کارگران را در سطر و مهارت‌ها را در ستون یک ماتریس مرتب کنید.

مرحله دوم: ساعات مورد نیاز هر مهارت را به سلول‌های ماتریس و متناسب با کارگران و نوع مهارت آنها تخصیص دهید.

مرحله سوم: براساس ماتریس به دست آمده در مرحله دوم، تمامی ترکیبات ممکن را محاسبه کنید.

اگر تعداد عناصر موجود در سطرiام ماتریس مرحله قبل را a_i بنامیم، از حاصل‌ضرب a_iها کل تعداد ترکیبات ممکن به دست می آید.

برای بررسی روش ابتکاری فوق، کار چهارم (کـارD) از مثال ارائه شده توسط گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) را در نظر بگیرید. فرض کنیم تنها سه نفرکارگر چنـد مهارته برای انجام این کار باشند؛ به طوری که کـارگر اول، دارای مهارت‌های یـک و دو، کـارگر دوم دارای مهارت‌های دو و سه و کارگر سوم دارای مهارت‌های یک وسه باشد. مطابق با مراحل ارائـه شـده در روش ابتکاری پیشنهادی، تمامی ترکیبات ممکن برای انجـام فعالیت ٤ را به شرح زیر به دست می‌آوریم.

مرحله اول و دوم: کارگران را در سطر و مهارت‌ها را در سـتون‌هـای مـاتریس نوشـته و بـا توجـه بـه مهارت‌هایی که هر کارگر داشته و ساعات مـورد نیـاز برای انجام هر مهارت از کار D، ماتریس را به شـکل زیر تکمیل‌می‌کنیم:

جدول ٦-۱- ترکیبات ممکن کارگران و مهارتها

	مهارت۳	مهارت۲	مهارت۱
کارگر ۱	--	٥	٦
کارگر ۲	۷	٥	---
کارگر ۳	۷	--	٦

مرحله سوم : تمامی ترکیبات ممکن ماتریس فوق را به دست آورده، مجموع ساعات کار اختصاص یافته به کارگران هر ترکیب را محاسبه می کنیم. در ماتریس فوق، تعداد کل ترکیبات ممکن، عبارت از $a_1 * a_2 * a_3 = 2*2*2 = 8$ ترکیب است. بنابراین، ترکیبات ممکن انجام کار D به شکل زیر خواهد بود:

جدول ٦-٢- ترکیبات ممکن انجام کار D

ترکیب	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
کارگر ۱	۱۱	۱۱	٦	٦	٥	٥	۰	۰
کارگر ۲	۷	۰	۱۲	٥	۷	۰	۱۲	٥
کارگر ۳	۰	۷	۰	۷	٦	۱۳	٦	۱۳

نتایج به دست آمده، دقیقاً مشابه با مقاله گوپالاک است. بنابراین، توانسته‌ایم به کمک روش ابتکاری فوق مساله تعیین ترکیب مهارت‌ها را حل کنیم.

۷- طراحی آزمایش ها

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری قدیم و مقایسه جواب آنها با الگوریتم‌های ابتکاری پیشنهادی، مسائل استانداردی بر اساس معیارهای زیر ایجاد شده است. تعداد کارها (A) در این مسائل متفاوت بوده، در مسائل کوچک (۱۰، ۱۵ و ۲۵ کار) در مسائل متوسط (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کار) و در مسائل بزرگ (۳۰۰، ٤۰۰ و ۵۰۰ کار) وجود دارد. تعداد مهارت‌ها (B) برای هر ۹ اندازه از تعداد کارها، چهار، پنج یا شش مهارت است. به ازای هر مساله تعریف شده، با تعداد کارهای A و تعداد مهارت‌های B، یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [100,500] ایجاد شده که درجه اولویت هر یک از کارها را نشان می‌دهد. هر چند در هر مساله می‌تواند چهار، پنج یا شش مهارت مختلف وجود داشته باشد (B)، ولی در مسائل ایجاد شده فرض می‌کنیم که هر کار (وظیفه) حداکثر می‌تواند دارای چهار مهارت مختلف باشد. برای تعیین تعداد مهارت‌های مورد نیاز برای انجام هر کار PM (D) یک عدد تصادفی یکنواخت گسسته بین ۱ تا ٤ ایجاد شده که نشان دهنده تعداد مهارت‌های مورد نیاز در هر کار PM است. در مرحله بعد برای شناسایی و تعیین دقیق نوع D مهارت لازم برای انجام یک کار، از B مهارت موجود در مساله، D عدد تصافی صحیح منحصر به فرد با توزیع یکنواخت گسسته بین ۱ تا B ایجاد می‌گردد. این اعداد نشان دهنده نوع مهارت‌های لازم برای انجام هر کار PM است. سپس D عدد تصادفی یکنواخت در بازه [1,15]ایجاد شده که نشان دهنده زمان مورد نیاز برای انجام هر مهارت از کار PM است.پس از تعیین تعداد کارها، تعداد مهارت‌ها و سایر اطلاعات مربوط به کارهای PM، باید تعداد کارگران و زمان در دسترس هر یک را مشخص کنیم. در مسائل ایجاد شده فرض می‌کنیم، تعداد کارگران با تعداد مهارت‌ها(B) برابر است. به عبارت دیگر، در هر مساله متناسب با تعداد مهارت‌ها، چهار، پنج یا شش نفر کارگر می‌توانند وجود داشته باشند و هر کارگر مسؤول انجام یکی از مهارت‌های مورد نیاز است. به ازای هر یک از B مهارت موجود در مساله، کل نفر ساعت مورد نیاز برای تکمیل هر مهارت از تمامی کارهای PM را محاسبه کرده و با فرض استفاده از کارگران تک مهارته برای تکمیل کارهای PM، این مقدار را به عنوان زمان در دسترس (۱۰۰٪) نیروی کار تک مهارته در نظر می‌گیریم. مشخص است که در سطح زمان در دسترس ۱۰۰٪ تمامی کارهای PM را می‌توان تکمیل کرد، حتی اگر از نیروی کار تک مهارته برای انجام کارهای PM استفاده شود. برای ایجاد مسائل دیگر، سطح زمان در دسترس تمامی کارگران را به ۹۰٪ و ۷۵٪ از کل زمان مورد نیاز تغییر می‌دهیم. تمامی مسائل فوق را در حالت نیروی کار دو مهارته بررسی می‌کنیم. بنابراین، در مجموع ۸۱ مساله (۹ سطح از تعداد کارها × ۳ سطح از تعداد مهارت‌ها × ۳ سطح از میزان نیروی کار در دسترس × ۱ نوع نیروی کار) برای تعیین نحوه عملکرد روش‌های ابتکاری ارائه شده، بررسی شده است. در مسائل با نیروی کار چند

مهارتـه، از طـرح آمـوزش‌هـای چنـد گانـه سـاده زیر(روش زنجیره‌ای) استفاده شده است و هر کارگر تک مهارته بـرای مهـارت بلافاصـله پـس از مهـارت خودش مورد آموزش چند گانـه قـرار گرفتـه اسـت. برای مثال، اگر مدل نیروی کار تک مهارته بـرای سـه نفرکارگر تک مهارته به ترتیب با مهارت‌هـای ۱، ۲ و ۳ باشد، آنگاه به ازای مدل نیروی کـار چنـد مهارتـه، سه نفر کارگر دو مهارته با مهارت‌های (۱و۲)، (۲و۳) و (۳و۱) وجود خواهد داشت.

تمـامی الگـوریتم هـای ابتکـاری و روش طراحـی آزمایش ها به زبان ویژوال بیسیک کد نویسی شـده و نتایج محاسباتی الگـوریتم هـای ابتکـاری ارائـه شـده توسط گوپالاک و همکاران(۱۹۹۷) و الگـوریتم هـای پیشنهادی با هـم مقایسـه شـده‌انـد. چهـار الگـوریتم ابتکاری ارائه شده توسط گوپـالاک و همکـاران را بـا نـــــام Old-H1، Old-H2، Old-H3 و Old-H4 و الگوریتم های پیشنهادی را بـا نـام New-H1، New-H2، New-H3 و New-H4 نشـــان مـــی‌دهـــیم. در جداول زیر نتـایج محاسـباتی مربـوط بـه روش‌هـای ابتکاری جدید و قدیم ارائه شـده اسـت. نتـایج ارائـه شده می‌تواند به عنوان مبنای مقایسه نسبی روش‌هـای ابتکاری جدید و قدیم و هم به عنـوان مبنـای تعیـین کیفیت جواب هر الگـوریتم ابتکـاری مـورد اسـتفاده شود. برای هر الگوریتم مقداری به نام کیفیت جـواب (SQ) محاسبه شده و به عنوان معیار سنجش کیفیـت جواب به دست آمده از هـر الگـوریتم در مقایسـه بـا جواب بهینه به دست آمده از مدل ریاضی (نرم افـزار GAMS) استفاده می شود. به ازای هر مسـاله و هـر روش ابتکاری، معیار کیفیت جـواب (SQ) بـه شـکل زیر محاسبه می‌گردد:

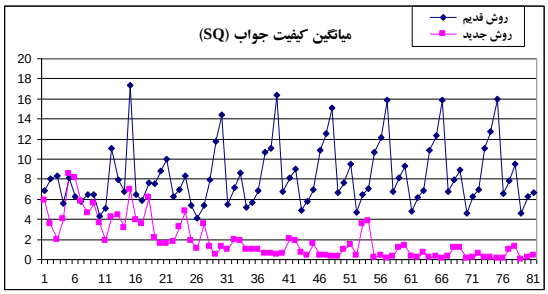
$$SQ = \left(Z^H - Z^*\right) \Big/ Z^* \times 100 \qquad ۱-۷$$

که Z^* جواب بهینه به دسـت آمـده از مـدل ریاضـی و Z^H جواب بـه دسـت آمـده از الگـوریتم ابتکـاری است. هر چه SQ بـه صـفر نزدیکتـر باشـد، بـه ایـن مفهوم است که الگوریتم ابتکاری دارای کارایی بهتری بوده، و جواب‌های به دست آمده توسط آن الگـوریتم به جواب های بهینه نزدیکتر است. از SQ بـه عنـوان معیاری برای سنجش کیفیت جـواب‌هـای بـه دسـت آمده توسط هر الگوریتم اسـتفاده مـی‌شـود. خلاصـه نتـایج حاصـل از روش‌هـای ابتکـاری گوپـالاک و همکـاران (۱۹۹۷) و الگـوریتم‌هـای پیشـنهادی در جدول ۷-۱ خلاصه شده است.

جدول ۷-۱- خلاصه نتایج حاصل از الگوریتم های ابتکاری

	الگوریتم های ابتکاری قدیم				الگوریتم های ابتکاری جدید			
	Old h1	Old h2	Old h3	Old h4	New h1	New h2	New h3	New h4
متوسط کیفیت جواب (**SQ**)	۱۵/۵۰	۱۵/۰٤	۱/٤۱	۱/۰٦	۲/۸٤	۲/۲۸	۱/۲٦	۱/۰٦
متوسط زمان حل	٦/۲۵	٦/٦۱	٦/۵۲	٦/۳٦	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۸
تعداد مسائل بررسی شده	۸۱	۸۱	۸۱	۸۱	۸۱	۸۱	۸۱	۸۱
تعداد جواب‌های بهینه	۰	۰	٦	۳	۰	۱	٦	٤
تعداد جواب‌های با $SQ < 5\%$	۳	۱	۷۷	۷۷	٦٤	۷۱	۷۸	۷۹

در جدول ۷-۱ خلاصه‌ای از نتایج حاصل از الگوریتم‌های ابتکاری پیشنهادی والگوریتم‌های قدیم به ازای مسائل کوچک، متوسط و بزرگ ارائه شده است. بر اساس اطلاعات جدول فوق، مشخص است که روش‌های ابتکاری پیشنهادی کاراتر و موثرتر از روش‌های ابتکاری گوپالاک بوده، این الگوریتم‌ها جواب‌های نزدیکتر به بهینه ارائه کردند. با توجه به اینکه هر چهار الگوریتم ابتکاری گوپالاک و همکاران، مستلزم بررسی ترکیبات ممکن هر فعالیت هستند، بنابراین، در زمان حل الگوریتم ها با هم اختلاف زیادی وجود ندارد، ولی با توجه به اینکه الگوریتم های سوم و چهارم از شاخص باقی مانده منابع (RRI) و شاخص مصرف (CI) برای انتخاب ترکیب مناسب استفاده می‌کنند، جواب‌های به دست آمده از این دو روش نسبت به الگوریتم های اول و دوم که هر فعالیت را به نخستین ترکیب موجه بدون هیچ معیاری تخصیص می‌دهند، بسیار بهتر است. میانگین کیفیت جواب (SQ) الگوریتم‌های پیشنهادی ۱/۸۶٪ بوده، در حالی که میانگین کیفیت جواب (SQ) الگوریتم های گوپالاک و همکاران ۸/۳۲٪ است. علاوه بر این، الگوریتم‌های ابتکاری در مدت زمان حل مساله نیز برتری درخور توجهی نسبت به الگوریتم های قبلی دارند، به طوری که میانگین زمان حل مسائل توسط الگوریتم های پیشنهادی ۰/۷۸ ثانیه و میانگین زمان حل مسائل توسط الگوریتم‌های گوپالاک و همکاران ۶/۴۳ ثانیه است. بنابراین، الگوریتم‌های ابتکاری جدید تواناتر و کاراتر از الگوریتم های قبلی عمل می‌کنند. در شکل ۷-۱ میانگین کیفیت جواب روش‌های ابتکاری جدید و قدیم به ازای تمامی مسائل کوچک، متوسط و بزرگ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

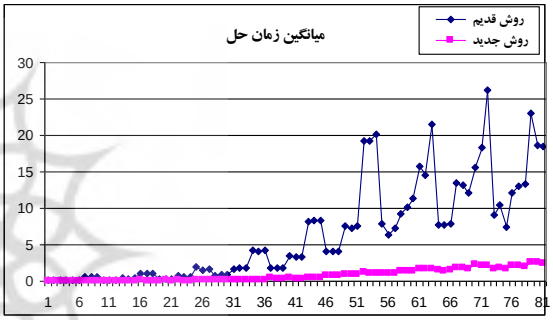


شکل ۷-۱- میانگین کیفیت جواب روشهای ابتکاری جدید و قدیم

به ازای هر مساله، روش‌های ابتکاری پیشنهادی جواب های بهتری نسبت به الگوریتم‌های گوپالاک و همکاران ارائه نموده اند، به جزء در سه مورد از مسائل کوچک (مسائل ۵، ٦ و ۷) که الگوریتم‌های قدیمی جواب های بهتری نسبت به الگوریتم های پیشنهادی داشته‌اند.علت این امر آن است که در مسائل کوچک تعداد ترکیب مهارت‌ها اندک بوده، همین امر می‌تواند مزیتی برای الگوریتم‌های ابتکاری گوپالاک و همکاران برای محاسبه جواب بهتری باشد، ولی با افزایش اندازه مساله(تعداد فعالیت‌ها، تعداد مهارت‌ها و تعداد کارگران) تعداد ترکیب کارگران نیز به صورت نمایی افزایش یافته، این امر امکان تعیین جواب نزدیک به بهینه را در مدت زمان اندک مشکل می نماید.

بر اساس شکل ۷-۱ مشخص است که بزرگترین مقدار میانگین شاخص کیفیت جواب (SQ) الگوریتم‌های ابتکاری قدیم، ۱۷/۳۵٪ بوده، درحالی که این مقدار برای الگوریتم‌های پیشنهادی ۸/۵۰٪ است. روشن است که با افزایش اندازه مساله کارایی روش‌های ابتکاری قدیم کاهش یافته و معیار SQ

جواب به دست آمده همچنان بالاست، ولی در روش‌های ابتکاری پیشنهادی با افزایش اندازه مساله معیار SQ جواب‌های به دست آمده کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در روش‌های ابتکاری جدید، با افزایش اندازه مساله درصد انحراف جواب به دست آمده توسط الگوریتم‌های ابتکاری جدید و جواب بهینه حاصل از مدل ریاضی کاهش می‌یابد. مدت زمان حل مسائل توسط روش‌های ابتکاری جدید نسبت به روش‌های قدیمی کمتر است. این مورد در شکل ۷-۲ نشان داده شده است.



شکل ۷-۲- میانگین زمان حل روشهای ابتکاری جدید و قدیم

همان‌گونه که در شکل نیز مشخص است، روش‌های ابتکاری جدید زمان حل کمتری نسبت به روش‌های ابتکاری قدیم دارند. این خصوصیت در تمامی مسائل اعم از کوچک، متوسط و بزرگ صادق است. با افزایش اندازه مساله (تعداد کارها، تعداد مهارت‌ها و تعداد کارگران) زمان حل مساله توسط هر دو نوع الگوریتم افزایش می‌یابد ولی این میزان افزایش با استفاده از الگوریتم‌های قدیمی بیشتر است. متوسط زمان حل تمامی مسائل با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری قدیم ٦/٤٣ ثانیه و با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری جدید ۰/۷۸ ثانیه است. بزرگترین متوسط زمان حل مسائل با استفاد ه از الگوریتم‌های قدیم ۲٦/۱۷ ثانیه بوده، ولی بزرگترین زمان حل مسائل با استفاده از الگوریتم‌های جدید ۲/٦۱ ثانیه است. بنابراین، روش‌های ابتکاری جدید در زمینه کیفیت جواب (SQ) و زمان حل نسبت به روش‌های ابتکاری قدیم برتری دارند. دو فاکتور دیگر که می‌توانند معیاری برای ارزیابی کارایی روش‌های ابتکاری جدید و قدیم باشد، عبارتند از: تعداد جواب‌های بهینه به دست آمده در هر روش (جواب‌هایی با $SQ = 0$) و تعداد جواب‌های به دست آمده با $SQ < 5\%$. براساس اطلاعات جدول ۷-۱ می‌توان گفت، تعداد جواب‌های بهینه به دست آمده توسط روش‌های ابتکاری جدید و قدیم تفاوت معناداری نسبت به یکدیگر نداشته و یکی از علل آن، این است که الگوریتم ابتکاری ارائه شده برای محاسبه ترکیب کارگران، توانسته است تمامی ترکیبات ممکن را مشخص کند. در زمینه تعداد جواب‌های با $SQ < 5\%$ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش‌های ابتکاری جدید در مقایسه با روش‌های ابتکاری قدیم عملکرد بهتر و قابل قبول‌تری داشته‌اند.

۸- نتیجه گیری

هدف هر مساله تعمیرات پیشگیرانه، زمانبندی و اجرای بیشترین تعداد فعالیت‌ها در دوره برنامه‌ریزی با محدودیت نیروی کار چند مهارته است. هر چند در تحقیقات گذشته مدل‌های ریاضی متعددی برای زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه ارائه شده است، ولی این مدل‌ها دارای نقایص و کاستی‌هایی چون: در نظر گرفتن نیروی کار تک مهارته و یا لزوم تعیین ترکیب کارگران قبل از مدل‌سازی مساله هستند. در مقاله

گوپالاک و همکاران هیچ اشاره‌ای به روش تعیین تمامی ترکیب کارگران نشده است.

نخستین جنبه نوآوری پژوهش حاضر، ارائه یک روش ابتکاری است که تمامی ترکیبات ممکن انجام کارهای PM را در حالت نیروی کار چند مهارته و تک مهارته محاسبه می کند. از این روش ابتکاری در حل مسائل شبیه سازی شده (۸۱ مساله ایجاد شده) با استفاده از مدل گوپالاک و همکاران استفاده شده است.

دومین جنبه نوآوری پژوهش حاضر، ارائه چهار روش ابتکاری است که می‌توانند، پاسخ نزدیک به بهینه برای مساله زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه، بدون نیاز به تعیین تمامی ترکیبات ممکن به دست آورند. با توجه به اینکه مساله زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه جزو مسائل Np-hard بوده، با افزایش اندازه مساله، تعداد متغیرهای آن به شدت افزایش می‌یابد وحل آن با استفاده از مدل‌های ریاضی به زمان بالا نیاز خواهد داشت، بنابراین، استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری برای محاسبه جواب نزدیک به بهینه، کمک زیادی به استفاده از این مدل‌ها در مسائل واقعی می‌نماید.

الگوریتم‌های ابتکاری فوق به زبان ویژوال بیسیک کد نویسی شده و توانایی آنها در تعیین جواب موجه نزدیک به بهینه نشان داده شده است. کارایی روش‌های ابتکاری ارائه شده در این پژوهش، با روش‌های ابتکاری ارائه شده در مقاله گوپالاک و همکاران (۱۹۹۷) مقایسه شده است. مسائل ایجاد شده در مدل شبیه سازی، با استفاده از هر دو نوع الگوریتم حل شده و نتایج آنها با هم مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد، که کیفیت جواب‌های به دست آمده در الگوریتم‌های ابتکاری جدید نسبت به الگوریتم‌های قبلی افزایش داشته و زمان حل مساله کاهش یافته است. زمینه‌ها و فرصت‌های تحقیقاتی بسیاری در حل مساله زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه وجود دارد. این امر به خاطر ماهیت پویا و متغیر تعمیرات پیشگیرانه و ارتباط نزدیک آن با مدیریت نگهداری و تعمیرات و مدیریت منابع انسانی است. در تحقیقات آتی باید الگوریتم‌هایی کارآتر و بهتر برای حل مسائل بزرگ توسعه داده شود. یکی دیگر از زمینه‌های تحقیقات آتی، توسعه و ارائه نرم افزاهای زمانبندی نیروی انسانی با استفاده از الگوریتم‌ها و روش‌های ارائه شده در این پژوهش، و سایر روش‌های دیگر است. از نرم افزار زمان‌بندی نیروی انسانی می‌توان در مسائل زمانبندی نگهداری و تعمیرات، مسائل نگهداری و تعمیرات هواپیما و زمانبندی پرستاران بیمارستان‌ها استفاده کرد.

۹- منابع:

Abdulwhab, A., R. Billinton, A. Eldamaty, and S. Faried. (2004). "Maintenance Scheduling Optimization Using a Genetic Algorithm (GA) with a Probabilistic Fitness Function", *Electric Power Components and Systems*, 32, 1239-1254.

Ahire, S., G. Greenwood, A. Gupta, and M. Terwilliger. (2000). "Workforce-constrained Preventive Maintenance Scheduling Using Evolution Strategies", *Decision Science*, 31(4), 833-859.

Allaoui.H,Lamouri.S,Artiba.A,Aghezzaf.E. (2008). "Simultaneously scheduling n jobs and the preventive maintenance on the two-machine flow shop to minimize the makespan*", Int. J. Production Economics* 112, 161˚167.

Bansal, R. (2005). Optimization Methods for Electric Power Systems: An Overview. The Berkeley Electronic Press, www.bepress.com/ijeeps/vol2/iss1/art1021.

Basker, B. and T. Husband. (1982/1983)." Simulating Multi-skill Maintenance: A Case Study", *Maintenance Management International*, 3, 173-182.

Blochliger, I. (2004). "Modeling Staff Scheduling Problems: A Tutorial",

maintenance into flexible flowshop scheduling problems. Applied Soft Computing, 11(2), 2094-2101.

Nguyen.D , Bagajewicz.M. (2008)Optimization of Preventive Maintenance Scheduling in Processing Plants. 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering.

Pereira.C.M.N.A, Lapa.C, Mol.A, Luz.A. (2010). A Particle Swarm Optimization (PSO) approach for non-periodic preventive maintenance scheduling programming. Progress in Nuclear Energy 52, 710-714.

Perrier, N., A. Langevin, and J. Campbell. (2006a). A Survey of Models and Algorithms for Winter Road Maintenance - Part I: System Design for Spreading and Plowing. Computers & Operations Research, 33, 209-238.

Perrier, N., A. Langevin, and J. Campbell. (2006b). A Survey of Models and Algorithms for Winter Road Maintenance- Part I: System Design for Snow Disposal. Computers & Operations Research, 33, 239-262.

Pierskalla, W. and J. Voelker. (1976). A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance of Deteriorating Systems. Naval Research Logistics Quarterly, 23(3), 353-388.

Qi, X., T. Chen, and F. Tu. (1999). Scheduling the Maintenance on A Single Machine. Journal of the Operational Research Society, 50(10), 1071-1078.

Quan, G., Greenwood, G. W., Liu, D., & Hu, S. (2006). Searching for multiobjective preventive maintenance schedules: Combining preferences with evolutionary algorithms. European Journal of Operational Research, 177, 1969˚1984.

Roberts, S. and L. Escudero. (1983). Minimum Problem-Size Formulation for the Scheduling of Plant Maintenance Personnel. Journal of Optimization Theory and Applications, 39(3), 345-362.

Ruiz.R,Garcia-Diaz.C, Maroto.C. (2007) . Considering scheduling and preventive maintenance in the flowshop sequencing problem. Computers & Operations Research 34, 3314 ˚ 3330.

European Journal of Operational Research, 158, 533-542.

Budai, G., D. Huisman, and R. Dekker. (2005)." Scheduling Preventive Railway Maintenance Activities", *Working Paper*

Cavory, G., Dupas, R., & Goncalves, G. (2001). "A genetic approach to the scheduling of preventive maintenance tasks on a single product manufacturing production line", *International Journal of Production Economics*, 74, 135˚146.

Chang, S., Y. Hong, J. Kim, and X. Kim. (1999). "A Heuristic Algorithm for Minimizing Maintenance Workforce Level", *Production Planning & Control*, 10(8), 778-786.

Ciarapica, F. E., & Giacchetta, G. (2006). "Managing the condition-based maintenance of a combined-cycle power plant: An approach using soft computing techniques",. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 316˚325.

Gopalakrishnan, M., S. Ahire, and D. Miller. (1997). Maximizing the Effectiveness of a Preventive Maintenance System: An Adaptive Modeling Approach. Management Science, 43(6), 827-840.

Gopalakrishnan, M., S. Mohan, and Z. He. (2001). A Tabu Search Heuristic for Preventive Maintenance Scheduling. Computers & Industrial Engineering, 40, 149-160.

Grigoriev, A., J. Van De Klundert, and F. Spieksma. (2005). Modeling and Solving the Periodic Maintenance Problem. Working Paper.

Lapa, C. M. F., Pereira, C. M. N. A., & Barros, M. P. (2006). A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability. Reliability Engineering and System Safety, 91, 233˚240.

Ma.Y,Chu.C, Zuo.C.(2010). A survey of scheduling with deterministic machine availability constraints. Computers & Industrial Engineering 58, 199˚211.

Maroti, G. and L. Kroon. (2005). Maintenance Routing for Train Units: The Interchange Model. Computers & Operations Research, in Press

Naderi.B,Zandieh.B, Aminnayeri.B. (2011). Incorporating periodic preventive

پی‌نوشت:

[1] Inspect Model
2 Replace Models
3 Repair Models
4 Procure Models
5 Age replacement policy
6 Preventive maintenance policy
7 Failure policy
8 Heuristic Algorithm
9 Artificial Intelligent Based Search Strategies
10 Genetic Algorithm
11 Tabu Search
12 Simulated Annealing
13 Neural Network
14 Ant Colony Optimization
15 Artificial Neural Network
16 Back Propagation
17 Cost- Reliability
18 Nondeterministic Polynomial Time
19 Simulation Optimization
20 Opportunistic Preventive Maintenance
21 Artificial Immune Algorithm
22 Particle Swarm Optimization
23 Priority
24 Consumption Index
25 Residual Resource Index
26 Total Time

Samrout, M., Yalaoui, F., Cha telet, E., & Chebbo, N. (2005). New methods to minimize the preventive maintenance cost of series˚ parallel systems using ant colony optimization. Reliability Engineering and System Safety, 89, 346˚ 354.

Shyur, H., J. Luxhoj, and T. Williams. (1995). Using Neural Networks to Predict Component Inspection Requirement for Aging Aircraft. Computers Industrial Engineering, 30(2), 257-267.

Sortrakul, N., Nachtmann, H. L., & Cassady, C. R. (2005). Genetic algorithms for integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. Computers in Industry, 56, 161˚ 168.

Wang, H. (2002). A Survey of Maintenance Policies of Deteriorating Systems. European Journal of Operational Research, 139, 469-489.

Wang.S, Yu.J. (2010) . An effective heuristic for flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. Computers & Industrial Engineering 59, 436˚ 447.

Zhou.X , Xi.L, Lee.J. (2009) . Opportunistic preventive maintenance scheduling foramulti-unit series system based on dynamic programming. ProductionEconomics118, 361˚ 366

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی