زمانبندی دو معیاره در محیط جریان کاری ترکیبی با ماشینهای غیر یکسان

رضا برادران کاظم زاده[*1]، سید حسام‌الدین ذگردی[2] و محمد علی بهشتی‌نیا[3]

[1]استادیار بخش مهندسی صنایع – دانشکده فنی و مهندسی – دانشگاه تربیت مدرس

[2]دانشیار بخش مهندسی صنایع – دانشکده فنی و مهندسی – دانشگاه تربیت مدرس

[3]دانشجوی دکتری بخش مهندسی صنایع – دانشکده فنی و مهندسی – دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۵/۴/۳ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۷/۸ ، تاریخ تصویب ۸۶/۱۱/۳۰)

چکیده

این مقاله به بررسي مساله زمانبندي در محيط جريان كاري تركيبي (Hybrid flow shop) با ماشينهاي غير يكسان و دو تابع هـدف كمينه كردن ميانگين ديركردها و ميانگين تاريخ تكميل كارها مي‌پردازد. اين مساله تاكنون در ادبيات موضوع مورد بررسي قرار نگرفته‌اسـت. محيط جريان كاري تركيبي در اكثر محيطهاي توليدي از قبيل سيم سازي، فنر سازي، صنايع الكترونيک و خطوط توليد محصولات مختلـف كاربرد دارد. ابتدا مدل رياضي عدد صحيح مختلط مساله بيان مي‌گردد و سپس سه الگوريتم ابتكاري با نامهاي Cluster، H1 و H2 بمنظور حل مساله توسعه داده مي‌شوند. الگوريتم ابتكاري Cluster براي تعيين توالي كارها از خوشه بندي استفاده مي‌كنـد. الگوريتمهـاي ابتكـاري H1 و H2 نيز بر پايه قواعد SPT و EDD توالي كارها را تعيين مي‌كنند. در ادامـه نيـز بـه مقايسـه الگوريتمهـاي ارائـه شـده بـا يكـديگر مي پردازيم كه نتايج نشاندهنده برتري الگوريتم Cluster نسبت به ساير الگوريتمها است.

واژه های کلیدی: زمانبندي- جريان كاري تركيبي- خوشه بندي- الگوريتم ابتكاري

مقدمه

با افزايش رقابت پذيري سازمانها اكثر محيطهاي توليدي كلاسيک جاي خود را به محيطهاي جديدتر داده-اند. يكي از اين محيطها، محيط جريان كاري تركيبي[1] است كه از تركيب دو محيط جريان كاري[2] و ماشينهاي موازي[3] بوجود آمده است. محيط جريان كاري تركيبي، داراي ساختاري شبيه به محيط جريان كاري است كه در آن به منظور افزايش ظرفيت توليد، در هر مرحله چند ماشين موازی وجود دارد. محيط جريان كاري تركيبي در اكثر صنايع از قبيل صنايع توليد سيم، فنر، اتومبيل و وسائل الكترونيک كاربرد دارد. از سوي ديگر استفاده از چند تابع هدف برای يک مساله زمانبندی، موجب نزديكتر شدن مساله زمانبندي به مسائل دنياي واقعي مي‌شود.

اين مقاله به بررسي مساله زمانبندي در محيط جريان كاري تركيبي با ماشينهاي غير يكسان، با هدف كمينه كردن جمع وزني دو تابع هدف ميانگين ديركرد كارها از زمان تحويلشان و ميانگين تاريخ تكميل كارها مي‌پردازد. براي حل مساله مذكور سه الگوريتم ابتكاري بنامهاي Cluster، H1 و H2 ارائه مي‌گردد كه مساله اصلي را به دو زير مساله تعيين توالي كارها و تخصيص كارها به ماشينها تقسيم مي‌كنند. الگوريتمهاي H1 و H2 بر پايه قواعد SPT و EDD توالي كارها را تعيين مي‌كنند. اين در حالي است كه الگوريتم Cluster برپايه خوشه بندي كارها، توالي كارها را تعيين مي‌كند.

تجزيه و تحليل خوشه بندي[4] تكنيكي است كه بوسيله آن برخي از عناصر در گروههايي با يكديگر تركيب يا تجزيه مي‌گردند، به نحوی كه از نظر برخي از شاخصها عناصر درون هر گروه با يكديگر مشابه و عناصر درون گروههاي مختلف از يكديگر متمايز باشند. روشهاي خوشه بندي را مي‌توان به دو دسته روشهای سلسله مراتبي و غير سلسله مراتبي تقسيم نمود. در روشهاي غير سلسله مراتبي تعداد گروهها از قبل مشخص هستند. اما در روشهاي سلسله مراتبي تعداد گروهها قبل از عمليات خوشه بندي مشخص نيست [1].

مرور مراجع

ابتدا سالوادر [2] مساله جريان كاري تركيبي را با در نظر گرفتن عدم وجود بافر در بين مراحل و وجود حالت جايگشتي[5] براي كارها و تابع هدف كمينه كردن بازه ساخت، مورد بررسي قرار داده است. وي از روش شاخه و حد براي بدست آوردن جواب بهينه استفاده كرده است.

* نویسنده مسئول : تلفن : ۰۹۱۲۴۰۱۹۴۰۷ , فاکس : ۸۲۸۸۳۳۸۱ , Email: rkazem@modares.ac.ir

لین و ژانگ [۳] طي مقاله‌اي، تحقيقات انجام شده در زمينه مسائل جريان كاري تركيبي را تا سال ۱۹۹۹ بررسي كرده و آنها را از سه ديدگاه مختلف، تقسيم بندي نموده‌اند. ديدگاهي كه به بررسي پيچيدگي پردازش مي‌پردازد، ديدگاهي كه به بررسي توابع هدف مختلف براي زمانبندي اين مساله مي‌پردازد و ديدگاهي كه به بررسي روشهاي مختلف حل مساله توجه دارد.

آنها تحقيقات انجام شده را از منظر پيچيدگي پردازش، به سه دسته‌ی مسائل دو مرحله‌اي، سه مرحله‌اي و k مرحله‌اي ($k\geq 3$)، از منظر معيارهاي مختلف به دو دسته‌ی توابع هدف مبتني بر جريان كارها[۶] و توابع هدف مبتني بر تاريخ تحويل[۷] و از منظر روشهاي حل نيز به دو دسته‌ی الگوريتمهاي مبتني بر شاخه و حد[۸] و الگوريتمهاي ابتكاري[۹] تقسيم بندي نموده‌اند.

تحقيقاتي كه روي مساله جريان كاري تركيبي بعد از سال ۱۹۹۹ انجام شده‌اند، عمدتا محدوديتهايي را نيز در نظر گرفته‌اند. بوتا جنولايز [۴] به بررسي مساله جريان كاري تركيبي با در نظر گرفتن محدوديتهاي تقدمي[۱۰] و شكاف زماني بين فعاليتها[۱۱] و تابع هدف كمينه كردن حداكثر تاخيرها پرداخته است. وي براي مساله مذكور شش الگوريتم ابتكاري جديد ارائه داده و به مقايسه آنها پرداخته است.

ساويک [۵] يک مدل عدد صحيح مختلط[۱۲] براي مساله جريان كاري منعطف[۱۳] با در نظر گرفتن بافرهاي مياني محدود در بين مراحل و تابع هدف كمينه كردن حداكثر زمان تكميل كارها[۱۴] ارائه داده‌است. وی در ادامه، يک مدل عدد صحيح مختلط را به منظور مدل كردن مساله مذكور با وجود مسيرهاي متفاوت ساخت براي هر محصول، توسعه داده‌است. ساويک [۶] يک مدل عدد صحيح مختلط را نيز براي حل مساله جريان كاري تركيبي با بافرهاي مياني محدود و زمانبندي دسته‌اي ارائه داده-است. در اين مساله هيچ دو كاري همزمان نمي‌توانند روي يک ماشين پردازش شوند و زمان پردازش كليه كارهاي متعلق به يک دسته يكسان است. كيپرسز و كولاماس [۷] يک الگوريتم ابتكاري براي مساله جريان كاري تركيبي با تابع هدف جمع وزني زمانهاي تكميل كارها ارائه داده‌اند. آنها برای جواب الگوريتم خود يک بدترين نرخ كران[۱۵] را ارائه داده‌اند. گوپتا و سايرين [۸] به بررسي مساله جريان كاري تركيبي با قابل كنترل بودن زمانهاي پردازش[۱۶] و موعدهاي تحويل قابل تعيين[۱۷] پرداخته‌اند. در اين مساله فرض شده است كه هر كار زمان آماده بودن[۱۸] جداگانه‌اي نسبت به ساير كارها دارد و تابع هدف، كمينه كردن جمع وزني زمان تكميل كارها، تاريخهاي تحويل، زمانهاي زودكر د[۱۹] و زمانهاي دير كر د[۲۰] كارها است. آنها الگوريتمهاي سازنده‌اي[۲۱] بر پايه تكنيكهاي افزودن كارها[۲۲] و الگوريتمهاي تكراري[۲۳] را بر پايه جستجوي محلي[۲۴] ارائه داده‌اند. آنها همچنين همسايگي‌هاي مناسبي را نيز براي يافتن جوابهاي با كيفيت بهتر ارائه داده‌اند. برتل و بيلات [۹] به بررسي مساله جريان كاري تركيبي با تابع هدف كمينه كردن جمع وزني تعداد كارهاي ديركرددار پرداخته‌اند. در تحقيق آنها فرض بر اين است كه قابليت متفاوت بودن سرعت ماشينها و مجاز بودن برگشت مجدد كارها[۲۵] به مراحل قبلي نيز وجود دارد. آنها يک الگوريتم Greedy و يک الگوريتم ژنتيک[۲۶] براي حل مساله مذكور ارائه داده‌اند. كرز و اسكين [۱۰] به بررسي مساله جريان كاري تركيبي با در نظر گرفتن زمانهاي آماده سازي وابسته به توالي[۲۷] و مجاز بودن پرش كارها از برخي مراحل پرداخته و سه دسته از الگوريتمهاي ابتكاري را براي حل مساله مزبور ارائه داده‌اند. الگوريتمهاي دسته اول بر پايه تخصيص ساده كارها به ماشينها و بدون توجه به زمانهاي پردازش آنها استوار هستند. الگوريتمهاي دسته دوم بر پايه روشهاي حل مساله فروشنده دوره گرد[۲۸] و الگوريتمهاي دسته سوم بر پايه قاعده جانسون[۲۹] استوار هستند. كرز و اسكين [۱۱] مجددا به بررسي همين مساله پرداخته و پس از مدلسازي عدد صحيح مختلط[۳۰] براي مساله مذكور و ارائه يک كران پايين، يک الگوريتم ژنتيک بنام RKGA را نيز براي حل آن ارائه داده‌اند. اينجين و دوپان [۱۲] به بررسي مساله جريان كاري تركيبي با تابع هدف كمينه كردن حداكثر زمان تكميل كارها پرداخته‌اند. در مساله آنها توالي كارها در تمام مراحل يكسان است. روش حل آنها يک الگوريتم سيستم ايمني مصنوعي[۳۱]است و از سيستم تدافعي بدن جانوران مهره‌دار الهام گرفته شده است. اكرو و پاترينا [۱۳] به برسي مساله جريان كاري تركيبي با تابع هدف كمينه كردن حداكثر زمان تكميل كارها پرداخته‌اند. الگوريتم آنها بر پايه تئوري محدوديتها[۳۲] استوار است.

آلايو و آرتيبا [۱۴] به بررسی مساله زمانبندی در محيط جريان كاری با در نظر گرفتن محدوديتهای مربوط به

نگهداری ماشین‌آلات پرداخته‌اند. آنها فرض کرده اند زمانهای آماده‌سازی، تخلیه و حمل و نقل بین ماشین آلات قابل صرف نظر کردن نبوده و در زمان پردازش منظور نشده‌اند. آنها توابع هدف مختلفی را از قبیل کمینه کردن بازه ساخت، میانگین زمان تکمیل کارها، حداکثر دیرکردها، میانگین دیرکردها و تعداد کارهای دیرکرد دار را بصورت جداگانه مورد بررسی قرار داده‌اند.

کیپرسز و کولاماس [۱۵] به بررسي مساله جريان كاري تركيبي با در نظر گرفتن تفاوت سرعت ماشينها و تابع هدف كمينه كردن حداكثر زمان تكميل كارها پرداخته‌اند. در تحقيق آنها فرض شده است كه يک توالي از قبل تعيين شده از كارها وجود دارد و روش ارائه شده توسط آنها به تخصيص كارها به ماشينها، بر اساس توالي داده شده، مي‌پردازد. اُگاز و سايرين [۱۶] به بررسي مساله جريان كاري تركيبي با تابع هدف كمينه كردن حداكثر زمان تكميل كارها و محدوديت نيازمندي چند ماشين براي هر عمليات در هر مرحله، پرداخته‌اند. آنها يک الگوريتم تقريبي[۳۳] بر پايه ايده الگوريتم جستجو ممنوع[۳۴] را براي حل مساله ارائه داده‌اند.

لو [۱۷] به حل مساله جريان كاري تركيبي با تابع هدف كمينه كردن جمع زمان در جريان كارها توسط الگوريتم ابتكاري مبتني بر شبيه سازي بازپخت[۳۵] پرداخته است. در اين مساله زمانهاي آماده سازي، مستقل از توالي ولي زمانهاي تخليه[۳۶]، وابسته به توالي فرض شده‌اند.

لوجندران و سايرين [۱۸] به بررسي مساله جريان كاري تركيبي با در نظر گرفتن زمانبندي گروهي[۳۷] و تابع هدف كمينه كردن حداكثر زمان تكميل كارها پرداخته‌اند. مساله آنها شامل دو سطح زمانبندي مي‌شود. در سطح اول توالي كارهاي درون هر گروه و در سطح دوم توالي گروهها تعيين مي‌شود. اگر كارهاي يک گروه، همگي روي يک ماشين پردازش شوند، تنها يک آماده‌سازي[۳۸] براي آنها كافي است در غير اينصورت چند آماده‌سازي جداگانه نياز است. آنها سه الگوريتم ابتكاري متفاوت براي حل اين مساله ارائه داده‌اند.

اکسان و تانگ [۱۹] به بررسی مساله زمانبندی در محیط جریان کاری ترکیبی با در نظر گرفتن دسته‌بندی کارها در مرحله آخر و کمینه کردن یک تابع هدف ترکیبی از زمان تکمیل کارها و انتظار کارها در مراحل میانی پرداخته‌اند.

با بررسي ادبيات موضوع مي‌توان نتيجه گرفت در ادبيات موضوع اكثر تحقيقات مساله جريان كاري تركيبي را با در نظر گرفتن يک يا چند ويژگي يا محدوديت مورد بررسي قرار داده‌اند.

از نظر روش حل مساله، بطور كلي تا كنون سه گروه از روشهاي حل براي مساله ارائه شده است. گروه اول شامل روشهاي دقيق از قبيل برنامه ريزي رياضي و الگوريتم شاخه و حد، گروه دوم شامل روشهاي فرا ابتكاري[۳۹] مثل شبيه سازي بازپخت، الگوريتم ژنتيک و الگوريتم جستجو ممنوع وگروه سوم شامل الگوريتمهاي ابتكاري هستند. از ديدگاه تابع هدف مورد بررسي، تحقيقات انجام شده را مي‌توان به دو دسته تقسيم‌بندي نمود. دسته اول تحقيقاتي هستند كه مساله زمانبندي را با يک تابع هدف مورد بررسي قرار داده‌اند كه تابع هدف مورد بررسي در اين تحقيقات عمدتا كمينه ساختن حداكثر زمان تكميل كارها مي‌باشد. دسته دوم نيز شامل تحقيقاتي مي‌شود كه مساله زمانبندي را با دو يا چند تابع هدف بررسي كرده‌اند. در اين دسته تحقيقي كه دو معيار ميانگين ديركردها و ميانگين زمان تكميل كارها را مورد بررسي قرار دهد وجود ندارد.

استفاده از تابع هدف كمينه كردن ميانگين ديركردها، سبب كاهش ميانگين ديركردها براي كارهاي تاخيردار مي‌شود. در اين حالت وضعيت كارهايي كه دچار تاخير نمي‌شوند، مهم نيست. از سوي ديگر استفاده از تابع هدف ميانگين زمان تكميل كارها سبب مي‌شود كه علاوه بر كاهش ميانگين زمان تكميل كارها، استفاده مطلوبي از منابع توليدي صورت گيرد. در اين حالت منابع توليدي سريعتر آزاد گشته و لذا انجام سفارشات جديد سريعتر آغاز گردد. استفاده از دو تابع هدف كمينه كردن ميانگين ديركردها و ميانگين زمان تكميل كارها باعث مي‌شود كه علاوه بر تاكيد بر كمينه ساختن ميزان ديركرد كارها از تاريخ تحويلشان، از منابع توليدي نيز استفاده مطلوبي صورت گيرد.

در اين مقاله مساله زمانبندي در محيط جريان كاري تركيبي با ماشينهاي غير يكسان، با تابع هدف كمينه‌سازي جمع وزني دو تابع هدف ميانگين ديركرد كارها از زمان تحويلشان و ميانگين تاريخ تكميل كارها مورد بررسي قرار مي‌گيرد و براي حل مساله مذكور يک الگوريتم ابتكاري بنام Cluster ارائه مي‌گردد كه از تجزيه و تحليل خوشه-

بندي براي تعيين توالي كارها استفاده مي‌كند. سپس اين الگوريتم با دو الگوريتم ابتكاري ديگر به نامهاي H1 و H2 كه بر پايه قواعد SPT و EDD توالي كارها را تعيين مي‌كنند، مقايسه مي‌گردد.

در ادامه اين مقاله، در بخش سه به تعريف مساله و ارائه يك مدل رياضي عدد صحيح مختلط براي آن مي‌پردازيم. در بخش چهارم به ارائه روشهاي حل مساله مورد نظر پرداخته مي‌شود. بخش پنجم به بيان نتايج محاسباتي بدست آمده از مقايسه و بررسي روشهاي مختلف حل مساله اختصاص يافته‌است. در بخش پاياني نيز نتيجه‌گيري و زمينه‌هاي مختلف براي تحقيقات آتي ارائه مي‌گردد.

تعريف مساله

در اين مقاله مساله زمانبندي در محيط جريان كاري تركيبي با ماشينهاي غير يكسان مورد بررسي قرار مي‌گيرد. در محيط جريان كاري تركيبي فرض مي‌شود كه تعداد n كار وجود دارند كه بايد در m مرحله روي آنها پردازش انجام شود. در هر مرحله، مانند مرحله j ، تعداد l_j ماشين وجود دارد. مسير انجام پردازش براي تمام كارها يكسان مي‌باشد و هر كار بايد از تمام مراحل عبور كند و در هر مرحله تنها بايد روي يكي از ماشينها پردازش شود. همچنين مانند ساير مسائل رايج زمانبندي، زمانهاي آماده سازي ماشين آلات، حمل و نقل بين مراحل و آماده بودن[40]، براي تمام كارها برابر صفر فرض شده و قطع كارها[41] مجاز نيست. ماشينها نيز دچار خرابي نمي‌شوند، ولي ممكن است در برخي از مواقع دچار بيكاري شوند.

در مساله مورد بررسي در اين مقاله علاوه بر فرضيات محيط جريان كاري تركيبي فرض مي‌شود كه ماشينهاي هر مرحله ممكن است از لحاظ سرعت انجام كار با يكديگر تفاوت داشته باشند. همچنين فرض مي‌شود كه زمان پردازش كار i روي ماشين k ام در مرحله j از رابطه زير بدست مي‌آيد:

$$p_{ijk} = \frac{p_{ij}}{v_{jk}} \mid \forall i = 1,2,...,n$$

كه p_{ij} بيانگر ميزان واحد زماني مورد نياز براي پردازش كار i در مرحله j و v_{jk} بيانگر سرعت ماشين k در مرحله j است. اين سرعت بيانگر اين مطلب است كه ماشين kام در مرحله jام، مي‌تواند v_{jk} واحد زماني مورد نياز براي پردازش كارها را در يك واحد زمان انجام دهد. استفاده از اين تعريف توسط كيپرسز و كولاماس[15] پيشنهاد شده است. توالي كارها در تمام مراحل يكسان است و هدف مساله كمينه ساختن مجموع وزني دو تابع هدف ميانگين ديركردها و زمانهاي تكميل كارها در مرحله آخر است. همانطور كه در بخش قبل ذكر گرديد، اين امر سبب مي‌شود تا علاوه بر تاكيد بر عدم تاخير كارها، انجام سفارشات جديد نيز سريعتر آغاز گردد. بمنظور ارائه مدل رياضي عدد صحيح مختلط براي مساله، ابتدا نمادهاي زير معرفي مي‌شوند.

n	تعداد كارها
m	تعداد مراحل
i	شاخص كار، i=1,2,…,n
j	شاخص مرحله،j=1,2,…,m
l_j	تعداد ماشينها در مرحله j
k	شاخص ماشين، $\forall j,k = 1,2,...,l_j$
v_{jk}	سرعت ماشين kام در مرحله j
p_{ij}	ميزان واحد زماني مورد نياز براي پردازش كار i در مرحله j
C_{ji}	زمان تكميل كار i در مرحله j
x_{jki}	اگر در مرحله j كار i به ماشين k تخصيص يابد برابر يک و در غير اينصورت برابر صفر است.
y_{il}	اگر كار i در توالي قبل از كار l قرار گيرد برابر يک و در غير اينصورت برابر صفر است.
d_i	بيانگر تاريخ تحويل كار i ام است.
T_i	ميزان ديركرد كار iام از تاريخ تحويلش كه برابر $\max\{C_{mi} - d_i, 0\}$ است.
W	ميزان وزن اختصاصي به توابع هدف كه بين صفر و يک مي‌باشد.
M	يک عدد خيلی بزرگ كه می توان آنرا برابر مجموع زمان پردازش كل كارها فرض نمود.

مدل رياضي عدد صحيح مختلط مساله مورد بررسي، در زير آورده شده‌است.

$$Min\ Z = W \times \sum_{i=1}^{n} \frac{C_{mi}}{n} + (1-W) \times \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i}{n}$$

Subject to:

$$\sum_{k=1}^{l_j} x_{jki} = 1 \qquad \forall i, j, k \qquad (۱)$$

$$C_{ji} \geq C_{(j-1)i} + \frac{p_{ji}}{v_{jk}} - M * (1 - x_{jki}) \qquad \forall i, j, k \qquad (۲)$$

$$C_{0,i} = 0 \qquad i = 1,...,n \qquad (۳)$$

$$C_{ji} + M * (2 + y_{il} - x_{jki} - x_{jkl}) \geq C_{jl} + \frac{p_{ji}}{v_{jk}}$$

$$C_{jl} + M * (3 - y_{il} - x_{jki} - x_{jkl}) \geq C_{ji} + \frac{p_{jl}}{v_{jk}}$$

$$j = 1,...,m,\ \ k = 1,2,...,l_j \qquad (۴)$$
$$\forall i, l \mid\ i < l$$

$$C_{mi} - d_i \leq T_i \qquad i = 1,2,...,n \qquad (۵)$$

$$x_{jki}, y_{il} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j, k, l \qquad (۶)$$

$$C_{ji}, T_i \geq 0 \qquad \forall i, j$$

مجموعه محدوديتهاي (۱) تضمين مي‌كند كه هر كار فقط به يک ماشين تخصيص مي‌يابد. مجموعه محدوديتهاي (۲) ارتباط بين تاريخ تكميل هركار با تاريخ تكميلش در مرحله قبل را در نظر مي‌گيرد. مجموعه محدوديتهاي (۳) زمان تكميل هر كار در مرحله صفر را برابر صفر در نظر مي‌گيرد. مجموعه محدوديتهاي (۴) ارتباط بين زمان تكميل كارهاي درون يک مرحله نسبت به هم را در نظر مي‌گيرد. مجموعه محدوديتهاي (۵) مقدار T_i را براي هر كار با توجه به زمان تكميل كارها در مرحله آخر تعيين مي‌كند. مجموعه محدوديتهاي (۶) محدوديت صفر و يك بودن متغير x_{jki} را در نظر مي‌گيريد.

روشهای حل مساله

در اين قسمت به بيان ۳ الگوريتم ابتكاري با نامهاي Cluster، H1 و H2 براي حل مساله مي‌پردازيم. اين سه الگوريتم براي حل مساله، آن را به دو زير مساله تعيين توالي كارها و تخصيص كارها به ماشينها تقسيم مي‌كنند. در اين قسمت ابتدا الگوريتم Cluster، كه بر مبناي خوشه بندي توالي كارها عمل مي‌كند و سپس الگوريتمهاي H1 و H2 ارائه مي‌گردند كه از قواعد SPT و EDD براي تعيين توالي كارها استفاده مي‌كنند. در مورد مساله تخصيص كارها به ماشينها هر سه الگوريتم ارائه شده، از روش يكساني استفاده مي‌كنند كه در قسمت بعد شرح داده مي‌شود.

زير مساله تخصيص كارها به ماشين ها

در اين الگوريتم نحوه تخصيص كارها به ماشينها طوري است كه در هر مرحله، بر اساس توالي آن مرحله، كار به ماشيني تخصيص مي‌يابد كه زودترين زمان تكميل را براي آن كار در آن مرحله (مستقل از ساير كارها)، بوجود آورد. اين امر با توجه به زمان آماده بودن ماشينها در آن مرحله انجام مي‌پذيرد.

زير مساله تعيين توالی كارها

الگوريتمهاي پيشنهادي ارائه شده از لحاظ تعيين توالي كارها، با يكديگر تفاوت دارند كه به شرح هر يک از آنها پرداخته مي‌شود.

الگوريتم Cluster

الگوريتم Cluster براي حل مساله تعيين توالي كارها به ماشينها، ابتدا براي هر كار يک زمان پردازش مجازي كه با $\widetilde{p}_i$ نشان داده مي‌شود را از طريق فرمول ۶ محاسبه مي‌كند.

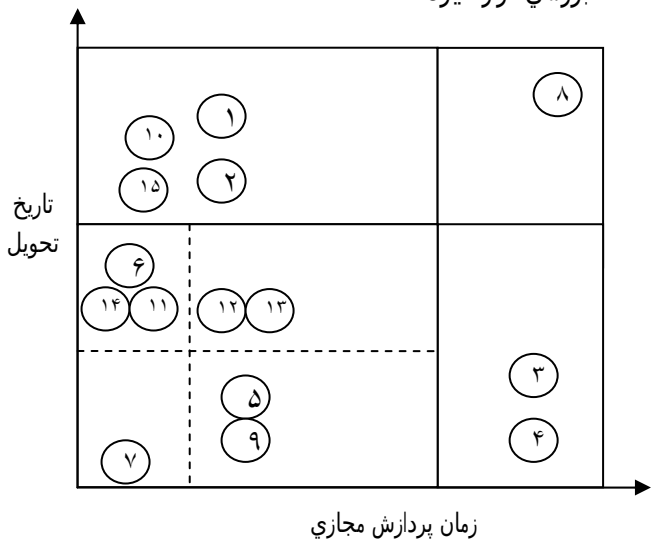
$$\widetilde{p}_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{p_{ij}}{\rho(j)}, \forall i \qquad (۷)$$

كه

$$\rho(j) = \sum_{k=1}^{l_j} \frac{v_{jk}}{l_j}, \forall j$$

در فرمول بالا $\rho(j)$ بيانگين ميانگين سرعت ماشين الات در مرحله j است و $\widetilde{p}_i$ به نوعي تخمين مدت زماني است

که پردازش هر کار تمام مي‌شود. سپس کارها از لحاظ هر یک از شاخصهاي تاریخ تحویل و زمان پردازش مجازي با استفاده از روش خوشه بندي غیر سلسله مراتبي 2-Mean به دو خوشه کم و زیاد خوشه بندي مي‌شوند. از ترکیب این خوشه ها ۴ خوشه بوجود مي‌آید (شکل ۱). خوشه اول شامل کارهایي مي‌شود که زمان پردازش مجازي کمي دارند و زودتر نیز باید تحویل مشتري گردند. خوشه دوم کارهایي هستند که زمان پردازش مجازي زیادي دارند ولي زمان تحویلشان به مشتري کم است. خوشه سوم کارهایي هستند که زمان پردازش مجازي کمي دارند ولي تاریخ تحویلشان به مشتري زیاد است. خوشه چهارم نیز شامل کارهایي مي‌شود که هم زمان پردازش مجازي بالا و هم تاریخ تحویل زیادي دارند. فرض کنید n_1، n_2، n_3 و n_4 بترتیب تعداد کارهاي درون خوشه‌هاي اول، دوم، سوم و چهارم باشند. به منظور تعیین اولویت قرار گرفتن خوشه-هاي مذکور در توالي نهایي، !۴ حالت ممکن باید مورد بررسي قرار گیرد.



شکل ۱: تشکیل ۴ دسته از کارها.

با محاسبه مقدار تابع هدف به ازاي هر یک از !۴ توالي ممکن، هر توالي از این چهار خوشه که داراي کمترین مقدار تابع هدف باشد، بعنوان بهترین توالي انتخاب مي‌شود. نحوه انجام این عمل در ادامه شرح داده مي‌شود. توالی تمام کارها در یک آرایه به نام Seq ذخیره می‌شود که توالی کارها در این آرایه قابل تغییر است. در حال اجرای الگوریتم به تدریج توالی برخی از کارها ثابت در نظر گرفته می‌شود و در نهایت پس از اتمام الگوریتم توالی تمام کارها در آرایه Seq ثابت و غیر قابل تغییر در نظر گرفته می‌شود. پس از بدست آمدن توالي با کمترین مقدار تابع هدف، مکان کارها بر اساس اولویت خوشه‌اي که به آن تعلق دارند، در آرایه Seq جابجا مي‌گردد. در اجراي الگوریتم Cluster، متغیري به نام level تعریف مي‌گردد که نشان‌دهنده سطح درخت جستجو است. مقدار این متغیر در ابتداي الگوریتم برابر ۱ فرض مي‌گردد. در هر سطح، پس از هر بار انجام عملیات خوشه‌بندي و تعیین توالی خوشه‌ها، چهار خوشه از کارها بوجود مي‌آیند که با $S_{level,1}$، $S_{level,2}$ ، $S_{level,3}$ و $S_{level,4}$ نشان داده مي‌شوند و به ترتیب نمایانگر مجموعه کارهاي متعلق به خوشه‌هاي با اولویت اول، دوم، سوم و چهارم هستند. سپس هر یك از این خوشه‌ها به ترتیب اولویت، مورد بررسي قرار مي‌گیرند. در این حالت سطح بررسي در درخت جستجو بیشتر شده و در نتیجه به مقدار متغیر level یك واحد اضافه مي‌گردد. اگر تعداد کارهاي متعلق به خوشه مورد بررسي کوچکتر یا مساوي با ۴ است، با استفاده از روش شمارش کامل بین کارهاي آن خوشه (با ثابت نگاه داشتن مکان سایر کارها در آرایه Seq) و زمانبندي تواليهاي حاصله، توالي با کمترین مقدار تابع هدف را بین کارهاي مذکور بدست آورده و بر اساس آن، مکان کارها را در آرایه Seq، تغییر مي‌دهد. در این حالت امکان جستجو در سطح با شماره بالاتر وجود ندارد. به منظور نمایش این امر از متغیري به نام $ACT_{level,k}$ به ازاي هر مجموعه $S_{level,k}$ (که $k=1, 2, 3, 4$)، تعریف مي‌گردد. مقدار صفر براي این متغیر بیانگر امکان جستجو در سطح با شماره بالاتر و مقدار یك براي این متغیر بیانگر عدم امکان جستجو در سطح با شماره بالاتر است. در صورتیکه تعدادکارها در خوشه مورد بررسي از ۴ بیشتر است، الگوریتم Cluster با اضافه کردن یك واحد به متغیر level، کارهاي متعلق به آن خوشه را مجددا به روش ذکر شده خوشه‌بندي مي‌کند و توالي با کمترین مقدار تابع هدف، بین خوشه‌هاي بدست آمده را تعیین مي‌کند.

تعیین توالی بین خوشه‌ها

به ازاي هر یک از !۴ توالي ممکن از خوشه‌ها، یک توالي از کارها در آرایه Seq بدست مي‌آید که در آن تمامي کارهاي خوشه داراي اولویت اول، جلوتر از تمامي کارهاي خوشه‌هاي داراي اولویت دوم، سوم و چهارم و تمامي کارهاي خوشه داراي اولویت دوم زودتر از تمامي کارهاي خوشه،هاي داراي توالي سوم و چهارم و تمام

كارهاي خوشه داراي اولويت سوم زودتر از تمامي كارهاي خوشه داراي اولويت چهارم مورد پردازش قرار مي‌گيرند. ترتيب كارهاي درون هر خوشه اختياري مي‌باشد. سپس توالي حاصله بر اساس الگوريتم تخصيص كارها به ماشينها زمانبندي شده و مقدار تابع هدف آن محاسبه مي‌گردد. با تغيير اولويت بين خوشه‌ها توابع هدف را براي هر يک از توالیها بدست آمده و توالي با كمترين مقدار تابع هدف ذخيره شده و بر اساس آن توالي كارها در آرايه Seq تغيير مي‌يابد. بطور مثال فرض كنيد يک توالي كه در آن خوشه‌هاي اول، سوم، چهارم و دوم به ترتيب در مكانهاي اول تا چهارم قرار بگيرند، توالي با كمترين مقدار تابع هدف باشد. با در نظر گرفتن خوشه‌بندي شكل (۱)، نحوه قرار گرفتن كارها در آرايه Seq مي‌تواند به صورت نشان داده شده در شكل (۲) باشد. توجه كنيد كه درون هر يک از اين خوشه‌ها توالي نهايي مشخص نمي‌گردد و تنها جلوتر قرار گرفتن كارها در خوشه‌هاي مختلف رعايت مي‌شود.

نحوه انجام گام به گام الگوريتم Cluster به اين صورت است:

گام صفر: براي هر كار يک زمان پردازش مجازي كه با $\widetilde{p}_i$ نشان داده مي‌شود را از طريق فرمول زير محاسبه كنيد.

$$\widetilde{p}_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{p_{ij}}{\rho(j)}, \forall i = 1,2,...,n$$

كه

$$\rho(j) = \sum_{k=1}^{l_j} \frac{v_{jk}}{l_j}, \forall j = 1,2,...,m$$

گام يک: كارها را بصورتي كه شرح داده شد، خوشه‌بندي كنيد.

گام دو: توالي با كمترين مقدار هدف را براي ۴ خوشه بدست آمده بيابيد. مجموعه هاي $S_{1,1}$ ، $S_{1,2}$ ، $S_{1,3}$ و $S_{1,4}$ را به ترتيب برابر كارهاي درون خوشه‌هاي با اولويت اول، دوم، سوم و چهارم تعريف كنيد و كارهاي آرايه Seq را بر اساس توالي بدست آمده مرتب كنيد.

گام سه: قرار دهيد level=1 (level شاخص نشاندهنده سطح درخت جستجو است)

گام چهار: در سطح كنوني (level) بين مجموعه‌هاي $S_{level,k}$ كه k=1, 2, 3, 4 مجموعه با كوچكترين شاخص k كه داراي $ACT_{level,k}$ برابر صفر است را انتخاب كنيد و قرار دهيد nc=k.

اگر هيچ كدام از مجموعه ها داراي $ACT_{level,k}$ برابر صفر نيست، آنگاه:

قرار دهيد Level=Level-1 و به گام شش برويد.

در غير اينصورت: به گام بعد برويد

گام پنج: اگر كارهاي متعلق به مجموعه $S_{level,nc}$ كمتر از ۴ است، آنگاه:

با استفاده از روش شمارش كامل توالي بهينه براي اين كارها را تعيين كنيد. قرار دهيد $ACT_{level,k} = 1$ و به گام چهار برويد.

در غير اين صورت: قرار دهيد level=level+1 و كارهاي درون مجموعه $S_{level-1,nc}$ را خوشه بندي كرده و پس از تعيين توالي با كمترين مقدار تابع هدف، آنها را به ترتيب اولويت به مجموعه هاي $S_{level,1}$ ، $S_{level,2}$ ، $S_{level,3}$ و $S_{level,4}$ اختصاص دهيد. همچنين قرار دهيد $ACT_{level,k} = 0$ (كه k=1,2,3,4) و به گام چهار برويد.

گام شش: اگر level=0 آنگاه:

الگوريتم را خاتمه دهيد

در غير اين صورت: در سطح كنوني (level) بين مجموعه هاي $S_{level,k}$ كه k=1, 2, 3, 4 ، مجموعه با كوچكترين شاخص k كه داراي $ACT_{level,k}$ برابر صفر است را انتخاب كرده و قرار دهيد $ACT_{level,k} = 1$ و به گام چهارم برويد.

الگوريتمهاي H1 و H2

بعلت اينكه در ادبيات موضوع اين مساله تاكنون مورد بحث قرار نگرفته‌است، لذا مبناي مناسبي براي ارزيابي الگوريتم ارائه شده وجود ندارد. لذا براي مقايسه كيفيت جوابهاي ارائه شده توسط اين الگوريتم، آن را با دو الگوريتم پيشنهادي ديگر با نامهاي H1 و H2 كه در زير مساله تعيين توالي كارها، بترتيب از قواعد SPT و EDD و در زير مساله تخصيص كارها به ماشينها از روش استفاده شده در الگوريتم Cluster استفاده مي‌كنند، بهره مي‌جوييم. لازم به ذكر است كه استفاده از ايده فوق براي تست الگوريتم پيشنهادي در تحقيقاتي ديگري نيز از قبيل [۱] و [۱۰] مشاهده مي‌شود. در الگوريتم H1 براي تعيين توالي كارها از مرتب كردن صعودي كارها بر اساس زمان پردازش مجازيشان استفاده مي‌شود و در صورت تساوي زمان پردازش مجازي براي دو كار، كاري كه موعد تحويل

کار	۷	۹	۵	۱۳	۱۲	۱۱	۱۴	۶	۱۵	۲	۱۰	۱	۸	۴	۳
خوشه	۱								۳				۴	۲	

شکل ۲ : آرایه Seq بعد از تعیین توالی خوشه ها.

جدول ۱: پارامترهای مختلف برای مسائل مختلف.

پارامتر مساله	پایین	متوسط	بالا
تعداد کارها	10	50	100
تعداد ایستگاهها	2	10	20
تعداد ماشینها در هر مرحله	1	U[1,4]	U[2,8]
زمانهاي پردازش	U[12,18]		U[8,22]
سرعت ماشینها	U[1,4]		
تاریخ تحویل	$U[P\times(1-T-L/2),P\times(1-T+L/2)]$		

کمتـري دارد در اولــويت قرار می گيرد. در الگوريتم H2 براي تعيين توالي کارها از مرتب کردن صعودي کارها بر اساس تاريخ تحويلشان استفاده مي‌شود. در صورت تساوي تاريخ تحويل براي دو کار، کاري که زمان پردازش مجازي کمتري دارد در اولويت قرار مي‌گيرد.

نتایج محاسباتی

در اين بخش ابتدا مسائل مختلف، با اندازه هاي مختلف را مورد بررسي قرار داده و سپس به مقايسه و ارزيابي الگوريتمهاي ارائه شده با يکديگر مي‌پردازيم.

تولید داده‌های تصادفی برای مساله

به منظور توليد انواع مثالهاي تصادفي براي ارزيابي الگوريتمهاي ارائه شده، شش پارامتر از مساله انتخاب شده‌اند (جدول ۱). براي پارامترهايي مانند تعداد کارها، تعداد ايستگاهها و تعداد ماشينهاي هر مرحله، سه سطح بالا، پايين و متوسط در نظرگرفته شده است. براي پارامتر زمان پردازش تنها دو سطح بالا و پايين و براي پارامترهاي سرعت ماشينها و تاريخ تحويل تنها يك سطح در نظر گرفته شده است.

براي پارامتر تاريخ تحويل از توزيع يکنواخت ارائه شده توسط پاتس و ون‌هاسنهو [۲۰] که بصورت $U[P\times(1-T-L/2),P\times(1-T+L/2)]$ است، استفاده مي‌شود. P برابر جمع زمان پردازش همه کارها، پارامتر T ميزان کوچک و بزرگ بودن و پارامتر L ميزان باز بودن گستره تاريخ هاي تحويل توليد شده را کنترل مي‌کند. براي مساله مورد بررسي پارامتر P بدين صورت تخمين زده شده‌است.

$$P=\sum_{j=1}^{m}\frac{\sum_{i=1}^{n}p_{ij}}{\sum_{k=1}^{l_j}v_{jk}}$$

براي پارامتر T دو مقدار ۰,۲ و ۰,۴ و براي پارامتر L سه مقدار ۰,۲، ۰,۵ و ۰,۸ در نظر گرفته شده‌است. لذا از ترکيب اين مقادير براي پارامتر تاريخ تحويل۶ سطح در نظر گرفته شده‌است.

بعنوان مثال براي پارامتر تعداد کارها ۳ سطح بالا، متوسط و پايين در نظر گرفته شده‌است. سطح پايين برابر ۱۰ کار، سطح متوسط برابر ۵۰ کار و سطح بالا برابر ۱۰۰ کار است. براي ماشينهاي درون هر مرحله نيزسه سطح بالا، متوسط و پايين در نظر گرفته شده‌است. سطح پايين بصورت قطعي بيانگر وجود يک ماشين در هر مرحله است. سطح متوسط بيانگر يک متغير تصادفي يکنواخت با ميانگين ۲,۵ و واريانس ۰,۷۵ است (بعبارت ديگر براي مرحله‌اي چون j داريم $l_j\approx U[1,4]$)، و در نهايت سطح بالا يک متغير تصادفي يکنواخت با ميانگين ۵ و واريانس ۳ است (بعبارت ديگر براي مرحله‌اي چون j داريم $l_j\approx U[2,8]$).

تعداد ترکيبات مختلفي که توسط مقادير مختلف اين ۶ پارامتر مي‌توان بدست آورد برابر ۳۲۴ (۶×۱×۲×۳×۳×۳)

نوع مساله است. از هر نوع مساله، پنج مثال بصورت تصادفي ايجاد شده و در داخل يك فايل متني قرار داده شده است (جمعا ۱۶۲۰ مساله). كليه برنامه هاي كامپيوتري اين تحقيق بوسيله زبان برنامه نويسي Visual Basic6 نوشته و توسط يک کامپيوتر P IV با پردازنده ۲۴۰۰ مگا هرتز اجرا شده‌اند.

مقايسه الگوريتمهاى ابتكارى

پس از تهيه مسايل تصادفي، هر يک از مسائل به ترتيب از داخل فايل متني مزبور خوانده شده و توسط الگوريتمهاي ابتكاري Cluster، H1 و H2 حل شده‌اند. بعبارت ديگر هر يک از الگوريتمهاي ابتكاري ۱۶۲۰ بار اجرا[۴۲] شده‌اند. نتايج بدست آمده از اجراي اين چهار الگوريتم ابتكاري در جدول (۲) نشان داده شده‌است.

نتايج جدول (۲) نشان مي‌دهد كه از نظر زمانهاي حل، الگوريتمهاي ابتكاري Cluster، H1 و H2 تفاوت زيادي با هم ندارند الگوريتم ابتكاري Cluster به ازاي كليه مقادير W، از نظر معيارهاي ميانگين جوابها و بالاترين تابع هدف، از الگوريتم H1 نتايج بهتري را مي‌دهد. اين برتري نسبت به الگوريتم H2 نيز براي كليه مقادير W، بجز W=1 وجود دارد. براي مقدارW=1، از نظر معيار بالاترين تابع هدف، الگوريتم Cluster و از نظر معيار ميانگين جوابها، الگوريتم H2 جواب بهتري را نسبت به ساير الگوريتمها مي‌دهند. از نظر معيار پايينترين تابع هدف به ازاي مقادير W= 0, 0.1, 0.2, 0.3 الگوريتم Cluster و به ازاي مقادير W= 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 الگوريتم H2 نتايج بهتري را نسبت به ساير الگوريتمها مي‌دهند.

همچنين بمنظور بررسی اثربخشی تقسیم مساله‌ی اصلی به دو زیر مساله‌ی تعیین توالی کارها و تخصیص کار به ماشینها، جوابهای بدست آمده از الگوریتم Cluster در مسائل با ابعاد کوچک با جواب بهینه (حاصله از روش شمارش کامل) مقایسه شده‌اند. در این حالت تعداد کارها برابر ۴ و تعداد ایستگاهها برابر ۲ در نظر گرفته شده‌اند. تعداد ماشینهای درون هر مرحله از توزیع یکنواخت U[1,3] تبعیت می‌کند. زمانهای پردازش، سرعت ماشینها و تاریخهای تحویل نیز از جدول (۱) تبعیت می‌کنند. از هر حالت ۵ مثال بطور تصادفی ایجاد گردید.

نتایج بدست آمده در جدول (۳) نشان می‌دهد که از نظر معیارهای بالاترین و پایین‌ترین مقدار تابع هدف در مسائل با ابعاد کوچک جواب بدست آمده از الگوریتم Cluster با جواب بدست آمده از روش شمارش کامل به ازای کلیه مقادیر W یکسان است. همچنین از نظر معیار میانگین جوابها، به ازای تمام مقادیر W، نتایج بدست آمده از الگوریتم Cluster اختلاف چندانی با روش بهینه ندارد.

همچنین به منظور ارزیابی توالیهای بدست آمده از الگوریتم Cluster، جوابهای بدست آمده از این الگوریتم با توالی بهینه مقایسه شده‌اند. در این حالت تعداد کارها برابر ۵، ۶ و ۷ در نظر گرفته شده است. تعداد ایستگاهها، ماشینهای درون هر مرحله، زمانهای پردازش، سرعت ماشینها و تاریخهای تحویل نیز از جدول (۱) تبعیت می‌کنند.

جدول ۲: نتايج بدست آمده از حل مسائل مختلف.

W	میانگین جوابها			بالاترین تابع هدف			پایین ترین تابع هدف			میانگین زمانهاي حل (بر حسب ثانیه)		
	الگوريتم ابتكاري Cluster	الگوريتم ابتكاري H1	الگوريتم ابتكاري H2	الگوريتم ابتكاري Cluster	الگوريتم ابتكاري H1	الگوريتم ابتكاري H2	الگوريتم ابتكاري Cluster	الگوريتم ابتكاري H1	الگوريتم ابتكاري H2	الگوريتم ابتكاري Cluster	الگوريتم ابتكاري H1	الگوريتم ابتكاري H2
۰	۲۸۱,۵۶	۲۸۳,۶۰	۳۰۱,۱۲	۹۷۲,۶۴	۱۰۱۴,۶۳	۱۰۵۸,۵۶	۹,۱۳	۹,۲۳	۹,۳۸	۰,۸۹۹	۰,۰۰۵۶	۰,۰۰۴۹
۰,۱	۲۵۳,۵۸	۲۵۵,۴۴	۲۷۱,۰۳	۸۷۵,۳۸	۹۱۳,۱۶	۹۵۲,۷۰	۸,۲۷	۸,۳۶	۸,۴۵	۰,۸۹۸	۰,۰۰۵۶	۰,۰۰۴۹
۰,۲	۲۲۵,۵۱	۲۲۷,۲۹	۲۴۰,۹۴	۷۷۸,۱۲	۸۱۱,۷۰	۸۴۶,۸۵	۷,۴۲	۷,۴۹	۷,۵۳	۱,۰۳۰	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۴۹
۰,۳	۱۹۷,۴۳	۱۹۹,۱۴	۲۱۰,۸۵	۶۸۰,۸۵	۷۱۰,۲۴	۷۴۰,۹۹	۶,۵۶	۶,۶۳	۶,۶۱	۰,۹۹۶	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۵۶
۰,۴	۱۶۹,۳۲	۱۷۰,۹۸	۱۸۰,۷۵	۵۸۳,۵۹	۶۰۸,۷۸	۶۳۵,۱۳	۵,۷۱	۵,۷۶	۵,۶۹	۰,۹۶۷۹	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۴۹
۰,۵	۱۴۱,۱۹	۱۴۲,۸۳	۱۵۰,۶۶	۴۸۶,۳۲	۵۰۷,۳۱	۵۲۹,۲۸	۴,۹۴	۴,۹۰	۴,۷۶	۰,۹۸۲	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۴۹
۰,۶	۱۱۳,۰۵	۱۱۴,۶۸	۱۲۰,۵۷	۳۸۹,۰۶	۴۰۵,۸۵	۴۲۳,۴۲	۴,۰۴	۴,۰۳	۳,۸۴	۰,۹۳۰	۰,۰۰۵۶	۰,۰۰۴۹
۰,۷	۸۴,۸۸	۸۶,۵۲	۹۰,۴۸	۲۹۱,۷۹	۳۰۴,۳۹	۳۱۷,۵۷	۳,۰۹	۳,۱۶	۲,۹۲	۰,۸۹۶	۰,۰۰۴۳	۰,۰۰۴۹
۰,۸	۵۶,۷۱	۵۸,۳۷	۶۰,۳۸	۲۰۰,۰۴	۲۴۰,۶۵	۲۱۱,۷۱	۲,۱۵	۲,۳۰	۲,۰۰	۰,۸۹۷	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۵۶
۰,۹	۲۸,۵۱	۳۰,۲۲	۳۰,۲۹	۱۳۱,۰۱	۱۸۸,۲۸	۱۳۵,۶۳	۱,۲۰	۱,۳۶	۱,۰۷	۰,۸۹۷	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۴۹
۱	۰,۲۴	۲,۰۶	۰,۲۰	۶۱,۹۲	۱۳۵,۹۲	۶۴,۲۴	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۹۰۶	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۴۹

جدول ۳ : بررسی اثربخشی تبدیل مساله‌ی اصلی به دو زیر مساله.

پایین ترین تابع هدف		بالاترین تابع هدف		میانگین جوابها		W
جواب بهینه	الگوریتم ابتکاری Cluster	جواب بهینه	الگوریتم ابتکاری Cluster	جواب بهینه	الگوریتم ابتکاری Cluster	
۹,۶۰	۹,۶۰	۴۸,۳۸	۴۸,۳۸	۲۱,۷۸	۲۱,۸۱	۰
۸,۷۴	۸,۷۴	۴۴,۰۶	۴۴,۰۶	۱۹,۸۱	۱۹,۸۵	۰,۱
۷,۸۸	۷,۸۸	۳۹,۷۵	۳۹,۷۵	۱۷,۸۵	۱۷,۸۸	۰,۲
۶,۹۶	۶,۹۶	۳۵,۴۴	۳۵,۴۴	۱۵,۸۵	۱۵,۸۸	۰,۳
۵,۹۶	۵,۹۶	۳۱,۱۳	۳۱,۱۳	۱۳,۸۴	۱۳,۸۷	۰,۴
۴,۹۷	۴,۹۷	۲۶,۹۷	۲۶,۹۷	۱۱,۸۱	۱۱,۸۴	۰,۵
۳,۹۸	۳,۹۸	۲۳,۴	۲۳,۴	۹,۷۴	۹,۷۸	۰,۶
۲,۹۸	۲,۹۸	۱۹,۸۳	۱۹,۸۳	۷,۶۶	۷,۷۰	۰,۷
۱,۹۹	۱,۹۹	۱۶,۲۶	۱۶,۲۶	۵,۵۷	۵,۶۱	۰,۸
۰,۹۹	۰,۹۹	۱۲,۶۹	۱۲,۶۹	۳,۴۷	۳,۵۱	۰,۹
۰	۰	۹,۱۳	۹,۱۳	۱,۳۷	۱,۴۱	۱

جدول ۴ : مقایسه با جواب بهینه برای مسائل با ابعاد کوچک.

پایین ترین تابع هدف		بالاترین تابع هدف		میانگین جوابها		W
جواب بهینه	الگوریتم ابتکاری Cluster	جواب بهینه	الگوریتم ابتکاری Cluster	جواب بهینه	الگوریتم ابتکاری Cluster	
۸,۹۵	۸,۹۷	۲۴۶,۴۴	۲۵۱,۳۰	۸۲,۷۳	۸۳,۴۲	۰
۸,۳۷	۸,۳۸	۲۲۱,۸۰	۲۲۶,۱۷	۷۴,۶۲	۷۵,۲۵	۰,۱
۷,۶۸	۷,۶۸	۱۹۷,۱۵	۲۰۱,۰۴	۶۶,۵۰	۶۷,۰۷	۰,۲
۶,۷۷	۶,۷۷	۱۷۲,۵۱	۱۷۵,۹۱	۵۸,۳۶	۵۸,۸۷	۰,۳
۵,۸۶	۵,۸۶	۱۴۷,۸۶	۱۵۰,۷۸	۵۰,۱۹	۵۰,۶۵	۰,۴
۴,۸۹	۴,۸۹	۱۲۳,۲۲	۱۲۵,۶۵	۴۲,۰۲	۴۲,۴۳	۰,۵
۳,۹۱	۳,۹۱	۹۸,۵۸	۱۰۰,۵۲	۳۳,۸۳	۳۴,۱۸	۰,۶
۲,۹۳	۲,۹۳	۷۳,۹۳	۷۵,۳۹	۲۵,۶۳	۲۵,۹۱	۰,۷
۱,۹۵	۱,۹۵	۴۹,۲۹	۵۰,۲۶	۱۷,۴۲	۱۷,۶۴	۰,۸
۰,۹۸	۰,۹۸	۲۹,۵۸	۲۹,۵۸	۹,۲۰	۹,۳۵	۰,۹
۰	۰	۲۰,۶۸	۲۰,۶۸	۰,۹۷	۱,۰۵	۱

نتایج بدست آمده در جدول (۴) نشان می‌دهد که تفاوت زیادی بین جوابهای بدست آمده از الگوریتم Cluster با جواب بهینه وجود ندارد. آزمایشات عددی انجام شده بیانگر این مطلب است که جوابهای الگوریتم پیشنهادی بطور متوسط تنها ۰,۶۳ درصد با جواب بهینه فاصله دارند. همچنین برای مسائل با ابعاد کوچک، جوابهای الگوریتم پیشنهادی بطور متوسط ۱,۶۹ درصد با جواب بهینه فاصله دارند.

نتیجه گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی

در این مقاله به بررسي مساله زمانبندي در محیط جریان کاري ترکیبي با ماشینهاي غیر یکسان و با

تابع هدف كمينه كردن مجموع وزني ميانگين ديركردها و ميانگين زمان تكميل كارها پرداخته شد. محيط جريان كاري تركيبي در اكثر كارخانه‌ها از قبيل سيم‌سازي، فنرسازي، صنايع الكترونيک و خطوط توليد محصولات مختلف كاربرد دارد.

ابتدا مدل رياضي عدد صحيح مختلط براي مساله مذكور ارائه شد و در ادامه ۳ الگوريتم ابتكاري به نامهاي Cluster، H1 و H2 براي حل مساله ارائه گرديد. نتايج نشان‌دهنده برتري الگوريتم ابتكاري Cluster از نظر معيارهاي ميانگين جوابها و بالاترين مقدار تابع هدف به ازاي كليه مقادير W بجز W=1 نسبت به ساير الگوريتمها است. همچنين به ازاي W=1 از نظر معيار بالاترين مقدار تابع هدف، الگوريتم Cluster و از نظر معيار ميانگين جوابها الگوريتم H2 جواب بهتري را نسبت به ساير الگوريتمها مي‌دهند. از نظر معيار پايينترين مقدار تابع هدف به ازاي مقادير W كه بين ۰ و ۰,۳ قرار دارند الگوريتم Cluster و به ازاي ساير مقادير W الگوريتم H2 نتايج بهتري را نسبت به ساير الگوريتمها مي‌دهند. همچنين الگوريتم Cluster براي مسائل با ابعاد كوچك با جواب بهينه مقايسه گرديد كه نتايج نشان از نزديكي جوابهاي بدست امده از الگوريتم Cluster با جواب بهينه دارد.

استفاده از روش ذكر شده براي حل مساله، وقتي محدوديتهايي مانند زمان شروع به مساله اضافه گردند، مي‌تواند زمينه‌اي براي انجام تحقيقات آتي باشد. همچنين استفاده از روش ذكر شده وقتي كه كارها به بيش از ۴ دسته خوشه‌بندي گردند، استفاده از ساير روشهاي خوشه-بندي غير سلسله مراتبي براي خوشه‌بندي كارها، تغيير روش تخصيص كارها به ماشينها و توسعه روشهاي فرا ابتكاري نظير الگوريتمهاي ژنتيك، شبيه‌سازي بازپخت و جستجو ممنوع براي حل مساله نيز مي‌تواند زمينه هايي ديگر براي تحقيقات آتي باشد. علاوه بر اين تركيب الگوريتمهاي فرا ابتكاري با الگوريتم ارائه شده مي‌تواند زمينه‌اي براي تحقيقات آتي باشد.

مراجع

1 - Sharma, S. (1996). *Applied multivariate techniques*, chapter 7, John wiley and sons incorporated, New York.

2 - Salvador, M. (1973). "A solution to a special case of flow shop scheduling problems." In: Elmaghraby, S.E. (Ed.), *Symposium on the Theory of Scheduling and its Applications*, Springer, Berlin, PP.83–91.

3 - Linn, R. and Zhang, W. (1999). "Hybrid flow shop scheduling: a survey." *Computers and Industrial Engineering,* Vol. 37, PP.57-61.

4 - Botta-Genoulaz, V. (2000). "Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness." *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, PP.101-111.

5 - Sawik, T. (2000). "Mixed integer programming for scheduling flexible flow lines with limited intermediate buffers." *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 31, PP.39-52.

6 - Sawik, T. (2002). "An exact approach for batch scheduling in flexible flow lines with limited intermediate buffers." *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 36, PP.461-471.

7- Kyparisis, G. J. and Koulamas, C. (2001). "A note on weighted completion time minimization in a flexible flow shop." *Operations Research Letters*, Vol. 29, PP.5–11.

8 - Gupta, J., KruK, K., Lau, V., Werner, F. and Sotskov, Y. N. (2002). "Heuristics for hybrid flow shop with controllable processing times and assignable due dates." *Computers and Operations Research*, Vol. 29, PP.1417-1439.

9 - Bertel, S. and Billaut, J. C. (2004). "A genetic algorithm for an industrial multiprocessor flow shop scheduling problem with recirculation." *European Journal of Operational Research,* Vol. 159, PP.651–662.

10 - Kurz, M. and Askin, R. (2003). "Comparing scheduling rules for flexible flow lines." *International Journal of Production Economics*, Vol. 85, PP.371–388.

11 - Kurz, M. E. and Askin, R. (2004). "Scheduling flexible flow lines with sequence-dependent setup times." *European Journal of Operational Research*, Vol. 159, PP.66–82.

12 - Engin, O. and Döyen, A. (2004). "A new approach to solve hybrid flow shop scheduling problems by artificial immune system." *Future Generation Computer Systems,* Vol. 20, PP.1083–1095.

13 - Acero-Dominguez, M. J. and Paternina-Arboleda, C. D. (2004). "Scheduling jobs on a K-stage flexible flow shop using a TOC-based (bottleneck) procedure." *Systems and Information Engineering Design Symposium*, PP.295-298.

14 - Allaoui, H. and Artiba, A. (2004). "Integrating simulation and optimization to schedule a hybrid flow shop with maintenance constraints." *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 47, PP.431–450.

15 - Kyparisis G. J. and Koulamas, C. (2006). "Flexible flow shop scheduling with uniform parallel machines." *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, PP.985-997.

16 - Oguz, C., Zinder, Y., Do, V. H., Janiak, A. and Lichtenstein, M. (2004). "Hybrid flow shop scheduling problems with multiprocessor task systems." *European Journal of Operational Research,* Vol. 152, PP.115–131.

17 - Low, C. (2005). "Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines." *Computers and Operations Research*, Vol. 32, PP.2013-2025.

18 - Logendran, R., Carson, S. and Hanson, E. (2005). "Group scheduling in flexible flow shop." *International. Journal of Production Economics*, Vol. 96, PP.143-155.

19- Xuan, H. and Tang, L. (2007). "Scheduling a hybrid flow shop with batch production at the last stage." *Computers and Operations Research,* Vol. 34, PP.2718- 2733.

20 - Potts, C. N. and Van Wassenhove, L. (1982). "Decomposition algorithm for the single machine total tardiness problem." *Operations Research.* Letters; Vol. 1, PP.77–81.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Hybrid Flow Shop
2 - Flow shop
3 - Parallel machines
4 - Cluster Analysis
5 - Permutation
6 - Flow time
7 -Due date
8 - Branch and Bound
9 - Heuristic
10 - Precedence constraint
11 - Time lag
12 - Mixed integer programming
13 - Flexible flow shop
14 - Maximum of completion times (Cmax)
15 - Worst-case ratio bound
16 - Controllable processing time
17 - Assignable due date
18 - Ready time
19 - Earliness
20 -Tardiness
21 Construction algorithms
22 - Job insertion techniques
23 - Iterative algorithms
24 - Local search

25 - Recirculation
26 - Genetic algorithm
27 - Sequence dependent
28 - Traveling sales man
29 - Johnson rule
30 - Mixed integer programming
31 - Artificial immune system
32 - Theory of constraint
33 - Approximation algorithm
34 - Tabu search
35 - Simulated annealing
36 - Removal time
37 - Group scheduling
38 - Set up
39 - Meta heuristic
40 - Ready times
41 - Preemption
42 - Run