تعيين نوع و زمانبندي بهينه نگهداري و تعميرات پيشگيرانه سيستمهاي چندجزيي بر اساس قابليت اطمينان

فرهاد كلاهان*[۱] ، محمد دوست پرست[۲] و مجتبي ماموريان[۳]

[۱]استاديار گروه مهندسي مكانيک - دانشگاه فردوسي مشهد

[۲]دانش آموخته كارشناسی ارشد مهندسی مكانيک - دانشگاه فردوسی مشهد

[۳]دانشجوی دكتری مهندسي مكانيک - دانشگاه فردوسي مشهد

(تاريخ دريافت ۸۴/۹/۱۹ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۴/۱۹ ، تاريخ تصويب ۸۶/۵/۲۷)

چكيده

در اين تحقيق، براي سيستم‌هاي چند جزيي، مدل برنامه ريزي بهينه نگهداري و تعميرات (نت) پيشگيرانه بر اساس قابليت اطمينان، ارائه و حل شده است. در مدل پيشنهادي نوع فعاليتهاي نتِ ادواري در هر بازه بازرسي بگونه‌اي تعيين مي‌شود كه، ضمن تامين سطح قابليت اطمينان مورد نياز، مجموع وزن دهي شده هزينه‌هاي مرتبط كمينه شود. در طراحي برنامه نت، دوره برنامه ريزي به تعدادي بازه بازرسي تقسيم شده و در ابتداي هر بازه، با در نظر گرفتن محدوديتهاي سيستمی، يكي از سه نوع فعاليت نت شامل: ۱) بازرسي و سرويس جزيي، ۲) تعميرات پيشگيرانه و ۳) جايگزيني پيشگيرانه براي هر جز پيشنهاد مي‌شود. هر يك از اين فعاليتها منابع مختلفي مصرف نموده و با توجه به موقعيت جز مورد تعمير، تاثير متفاوتي بر قابليت اطمينان سيستم مي‌گذارد. هزينه‌های در نظر گرفته شده شامل هزينه های تعمير، جايگزيني، خواب سيستم و خرابي‌های اتفاقي مي‌باشند. در برنامه بهينه نت، با تعيين نوع فعاليت‌ها در هر بازه زماني، سطح مشخصي از قابليت اطمينان سيستم، با حداقل مجموع هزينه هاي فوق حفظ مي‌شود. از آنجا كه مدل پيشنهادي داراي ساختاري پيچيده است، بمنظور حل سريع آن از الگوريتم هاي تبريد تدريجي (Simulated Annealing) و جستجوگر ممنوعه (Tabu Search) استفاده شده است. كارايي اين روش‌ها، در قالب حل مسئله برنامه نگهداري و تعميرات براي سيستمي شامل ۱۴ ايستگاه (جزء) نشان داده شده است.

واژه هاي كليدي: قابليت اطمينان - نت پيشگيرانه - بهينه سازی - جستجوگر ممنوعه - الگوريتم تبريد تدريجي

مقدمه

امروزه در واحدهای صنعتي به دليل رقابتي بودن توليد و لزوم كاهش هزينه‌ها و تحويل به موقع كالاها، در دسترس بودن تجهيزات و جلوگيري از توقفات پيش بيني نشده از اهميت خاصي برخوردار شده است. همچنين خرابي‌هاي اتفاقي باعث تحميل هزينه‌هاي اضافي به سيستم مي‌شود. بنابراين سعي مي‌گردد با انجام فعاليتهاي نگهداري و تعميرات (نت) پيشگيرانه، خرابي‌هاي اتفاقي به حداقل ممكن كاهش يابند. فعاليتهاي نت محدود به صنعت خاصي نشده و در بسياري از صنايع مانند نيروگاه-ها، صنايع هواپيمايي و سيستم‌هاي توليدي، كه خرابي‌ها اتفاقي خسارت جاني و مالي فراوان دارند، يك امر ضروري است.

يكي از شاخص‌هاي مهم در ارزيابي عملكرد و پيش‌بيني نرخ خرابي‌های سيستم‌ها، قابليت اطمينان[۱] است كه به صورت احتمال عملكرد صحيح تجهيزات، در شرايط معين و تا زمان مشخص، تعريف مي‌شود[۱]. قابليت اطمينان يک سيستم به ساختار و قابليت اطمينان هر جزء آن بستگي دارد. از طرف ديگر قابليت اطمينان هر جزء تابعي از عمر مصرف شده آن است. در صورت عدم انجام سرويسها و تعميرات پيشگيرانه، با افزايش عمر اجزا و قطعات، قابليت اطمينان آنها كاهش مي‌يابد. بنابراين براي حفظ عملكرد سيستم در وضعيت مطلوب، مي‌بايست فعاليت‌هاي نگهداري و تعميرات مناسب در زمانهاي لازم انجام گيرد.

فعاليت‌هاي تعميرات و نگهداري، براساس زماني كه انجام مي‌شوند، به دو دسته كلي تعميرات اصلاحي[۲] و تعميرات پيشگيرانه[۳] قابل تقسيم مي‌باشند. طبق استاندارد MIL-STD-721B تعميرات اصلاحي فعاليت‌هايي هستند كه پس از بروز خرابي به منظور راه‌اندازي مجدد سيستم انجام مي‌پذيرند[۲]. در مقابل، تعميرات پيشگيرانه شامل

* نويسنده مسئول : تلفن : ۰۹۱۵۳۱۱۴۱۱۲ , فاكس : ۰۵۱۱-۸۷۶۳۳۰۱ , Email: kolahan@um.ac.ir

فعاليت‌هاي برنامه‌ريزي شده است كه به منظور حفظ و ارتقاء قابليت اطمينان در سطح مطلوب سيستم انجام مي‌شوند. تفاوت عمده تعميرات اصلاحي و پيشگيرانه در زمان انجام هر يک است. تعميرات اصلاحي پس از وقوع خرابي بصورت موردي و تعميرات پيشگيرانه قبل از خرابي سيستم و به شكل برنامه‌ريزي شده صورت مي‌گيرند.

تعميرات اصلاحي خود به دو دسته حداقل تعمير[٤] (1C) و جايگزيني اصلاحي[٥] (2C) تقسيم مي شود[٣]. عمليات حداقل تعمير، عمر سيستم را تغيير نمي‌دهد بلكه قابليت اطمينان سيستم را به قبل از بروز خرابي ارتقاء مي‌دهد. در مقابل، جايگزيني اصلاحي عمر مصرف شده را به صفر برمي‌گرداند و قابليت اطمينان سيستم را به حالت "نو" تبديل مي‌نمايد. تعميرات پيشگيرانه نيز به دو دسته تعميرات پيشگيرانه ساده[٦] (1P) و جايگزيني پيشگيرانه[٧] (2P) تقسيم مي‌شوند. تعميرات پيشگيرانه ساده عمر مصرف شده سيستم را كم كرده و در نتيجه قابليت اطمينان سيستم را، براي باقيمانده دوره كاري، ارتقاء مي‌دهد. از جمله فعاليت‌هاي تعميرات پيشگيرانه مي‌توان به باز و بست، تنظيم و كاليبره‌كردن اشاره نمود. جايگزيني پيشگيرانه نيز، مانند جايگزينی اصلاحی، قطعات خراب را جايگزين می‌كند و منحنی قابليت اطمينان را به حالت "نو" تبديل می كند.

مزيت اصلي تعميرات پيشگيرانه جلوگيري از بروز خرابي‌هاي اتفاقي و خسارت‌هاي شديد ناشي از اين نوع خرابي‌ها است. برنامه تعميرات پيشگيرانه يكي از قسمت-هاي مهم برنامه ريزي نگهداري و تعميرات است كه با تحليل و بررسي سيستم و به منظور جلوگيري از وقوع خرابي و كاهش زمان خواب[٨] آن، زمان و سطح تعميراتِ تجهيزات را مشخص مي‌كند. مهمترين هدف برنامه ريزي نگهداري و تعميرات (نت)، انجام فعاليت‌هاي اصلاحي و پيشگيرانه براي حفظ شرايط مطلوب و ارتقاء راندمان سيستم است. عوامل موثر در تدوين يک برنامه نگهداري و تعميرات شامل فاصله بين تعميرات، زمان خواب دستگاه، سطح تعميرات، طول عمر مفيد سيستم يا اجزا آن، قابليت اطمينان سيستم و منابع مورد نياز براي تعميرات مي‌باشند. همچنين در مسئله كلي تعميرات و نگهداري براي تصميم‌گيري در مورد نوع تعميرات و زمان انجام تعميرات بايد به محدوديت‌هايي مانند حداقل قابليت اطمينان مورد نياز و منابع موجود، توجه شود.

در چند دهه گذشته، تحقيقات متعددي درباره برنامه‌ريزي نت پيشگيرانه، با در نظر گرفتن اهداف و ويژگيها مختلف، صورت گرفته است. بطور كلي در برنامه-ريزي نت پيشگيرانه دو مقوله تخصيص منابع مورد نياز نت و زمانبندي انجام نت، مورد توجه قرار مي‌گيرند. از ديدگاه ديگر، سياست‌هاي نگهداري و تعميرات را، بر اساس جزئي از سيستم كه براي انجام تعميرات انتخاب مي‌شود، به دو دسته تعميرات تك جزئي و چند جزئي مي‌توان تقسيم نمود[۴]. در روش برنامه‌ريزي تک جزئي، برنامه نت براي هر جزء سيستم بصورت مستقل ارائه مي‌شود. يكي از عمومي‌ترين سياست‌هاي نت در اين گروه، تعميرات براساس طول عمر اجزاء مي‌باشد. در اين روش تعمير و جايگزيني، هنگامي كه طول عمر هر قطعه به مقدار مشخصي برسد، و يا در هنگام خرابي آن (هر كدام كه زودتر اتفاق بيفتد)، انجام مي‌شود [۵].

براي سيستم‌هايي داراي اجزاي مرتبط (از لحاظ عملكردي و ساختاري)، روش‌های نت چند جزئي، كاربرد و دقت بيشتري دارند. در اين گونه سيستم‌ها برنامه نتِ هر جزء، با توجه به حالت كلي سيستم ارائه و اجرا مي‌شود. در چنين مواردي، هنگاميكه سيستم براي تعمير يك زير سيستم متوقف مي‌شود، ديگر اجزاء را نيز ميتوان تعمير و سرويس نمود. همچنين ممكن است كه هزينه دمونتاژ و مونتاژ سيستمي به حدي زياد باشد كه صرفه اقتصادي در اين باشد كه در هنگام دمونتاژ سيستم و تعمير قطعه‌اي خاص، ساير قطعات ديگر نيز كه احتمال خرابي دارند، تعمير و يا سرويس شوند. در اين راستا، براي سيستم‌هاي چند جزيي سري- موازي، بريس و همكارانش[۶]، زمان شروع و پريود تعميرات را بگونه‌اي تعيين نموده‌اند، كه ضمن حفظ حداقل دردسترس پذيري[٩]، هزينه‌هاي تعميرات پيشگيرانه كمينه شود. هزينه در نظر گرفته شده در تحقيق مذكور فقط شامل هزينه مستقيم نت مي‌باشد و از هزينه‌هاي غير مستقيم ناشي از نت، مانند توقف سيستم، صرفنظر شده است. آنها برای حل مدل پيشنهادی خود الگوريتم ژنتيک[١٠] را بكار برده‌اند. ساموت و همكارانش[۷]، از مدل بريس استفاده كرده اما برای حل آن از الگوريتم كلني مورچه‌گان بهره گرفته‌اند.

لاپا و همكارانش[۸]، متوسط دسترس‌پذيري نيروگاه‌ها را با در نظر گرفتن بار فصلي آنها، به عنوان تابع هدف در نظر گرفته و مسئله برنامه ريزي نت را با استفاده

از الگوريتم ژنتيک حل نموده‌اند. در مدل پيشنهادي آنها، ٦ ماه از سال بعنوان فصل پر بار در نظر گرفته شده است. بنابراين با اعمال محدوديت فصلی، سعی گرديده بيشتر تعميرات در فصل کم کاری سيستم انجام گيرد. همچنين تمامي سيستم بصورت يک مجموعه تک جزيي مدلسازي شده و به نقش اجزا مختلف و هزينه‌هاي نت توجهي نگرديده است. آنها برای مطالعه موردی سيستم تامين آب رآکتورهای هسته‌ای را در نظر گرفتن و برای مدلسازی عمر سيستم از توزيع وايبل استفاده نموده‌اند. در همين راستا، هاريش و همکارانش[۹] مسئله تخصيص منابع مشترک بين تعميرات و توليد را مورد توجه قرار داده‌اند و برای حل مدل ارائه شده از روش برنامه‌ريزی عدد صحيح استفاده کرده‌اند. بررسي جامعي از ادبيات موضوع در اين زمينه را مي‌توان در مرجع [۴] يافت.

اگر چه تحقيقات در زمينه نت پيشگيرانه گسترده است، ولی بسياري از مدلهاي ارائه شده جامعيت لازم را نداشته و برخي از پارامترهاي مهم در فعاليتهاي نت را لحاظ نمي‌کنند. در برخی موارد نيز، مدلهاي ارائه شده آنقدر پيچيده و بزرگ هستند که حل آنها در زمانهاي قابل قبول محاسباتي براي سيستم‌هاي واقعي مقدور نيست. همچنين در بعضی از تحقيقات گذشته، وابستگي عملکردي اجزا و محدويت منابع مشترک بدرستي لحاظ نشده و يا شاخص عملکردي مناسبي براي بهينه سازي انتخاب نگرديده است[۵]. يکي ديگر از مشکلات در برخي از تحقيقات موجود، خاص و موردي بودن آنها است که کاربرد اين مدلها را تا حد زيادي محدود مينمايد[۸]. در تحقيق حاضر، هدف ارائه و حل مدلي جامع از برنامه‌ريزي نت پيشگيرانه، با در نظر گرفتن هزينه‌ها و ويژگيهاي مهم يك سيستم واقعي است. همچنين، مدل و روش حل پيشنهادي، حتي‌الامکان انعطاف‌پذير طراحي شده‌اند بطوريکه براي اغلب سيستمها قابل انطباق و پياده‌سازي ميباشد [۱۰]. ساختار مسئله و روش حل آن در قسمتهاي بعدي تشريح مي‌شوند.

تعريف مسئله

قابليت اطمينان از معيارهاي مهم در ارزيابي عملکرد تجهيزات و ماشين آلات بشمار مي‌آيد. بطوريکه در برنامه-ريزي نتِ سيستمهاي صنعتي، همواره سعي مي‌شود سطح مطلوبي از قابليت اطمينان حفظ گردد. سيستم‌هاي صنعتي معمولا از اجزا و قطعات متعددي تشکيل يافته‌اند که از جنبه‌هاي مختلفي با يکديگر در ارتباط مي‌باشند. از نقطه نظر تحليل قابليت اطمينان، در سيستم‌هاي چند جزئي, ارتباط اجزاء مي‌تواند به صورت سري يا موازي و يا در حالت کلي سري- موازي (مختلط) باشد. در چنين ساختارهايي، بر حسب موقعيت اجزا و نحوه ارتباط آنها، خرابي يك جز ممکن است منجر به از کارافتادگي تمامي سيستم (خواب سيستم) شود و يا اينکه مانع عملکرد کلي مجموعه نشده و تنها قابليت اطمينان آن را کاهش دهد. در هر حال، خرابي‌هاي اتفاقي مطلوب نيستند. زيرا به دليل وارد شدن خسارت به تجهيزات، عدم آمادگي پرسنل و به تاخير افتادن تعهدات و سفارشات سيستم، باعث تحميل هزينه‌هاي اضافي مي‌شوند. از آنجا که با افزايش تعداد يا نرخ خرابي‌ها[11]، قابليت اطمينان تنزل مي‌يابد، همواره سعي مي‌شود که با انجام نت پيشگيرانه، تعداد خرابي‌هاي اتفاقي کاهش يافته و سطح مطلوبي از قابليت اطمينان تامين گردد. ولي در بسياري از مواقع کمبود منابع، از جمله نيروي انساني و قطعات يدکي، تعداد و سطح فعاليت‌هاي نت را محدود مي‌نمايد. بعلاوه، بر حسب نوع تعميرات و موقعيت جز مورد نظر در سيستم، انجام نت خود مي‌تواند باعث خواب سيستم شده و زمان مفيدِ کاري آن را کاهش دهد که اين نيز افزايش هزينه‌ها را به دنبال خواهد داشت. بنابراين، ارائه و اجراي برنامه نت پيشگيرانه بهينه براي حفظ يک سطح مشخص قابليت اطمينان در طول دوره برنامه‌ريزي با حداقل هزينه ممکن، ضروري بنظر مي‌رسد.

هزينه‌هاي مرتبط با فعاليت‌هاي نت شامل هزينه‌هاي مستقيم تعمير و جايگزيني و هزينه‌هاي غير مستقيم ناشي از خرابي‌هاي اتفاقي و خواب سيستم مي‌شوند. هزينه پرسنلي و قطعات يدکي از مهمترين هزينه‌هاي مستقيم نت هستند. هزينه‌هاي غير مستقيم شامل خسارات ناشي از خرابي‌هاي اتفاقي، افت کيفيت و کاهش راندمان سيستم مي‌شوند. با اينحال ماهيت و مقدار هر يك از اين هزينه‌ها وابسته به نوع و ساختار سيستم مورد نظر است و برنامه نت مي‌بايست بگونه‌اي باشد تا ضمن کمينه نمودن اين هزينه‌ها، محدوديت‌هاي سيستمي را نيز لحاظ نمايد.

در طراحي برنامه نت از دو روش نت ادواري و غير ادواري استفاده مي شود[۱۱]. در برنامه‌ريزي نت ادواري،

نوع تعميرات براي هر جز از سيستم از قبل مشخص است و تنها بازه زماني سرويس‌دهي تعيين مي‌شود[۶]. در اين رويكرد، بهترين بازه زماني براي سرويس‌ها با توجه به محدوديتها و اهداف مورد نظر، تعيين مي‌گردند.

در سياست نت غير ادواري، سيستم در بازه‌هاي زماني مشخص و ثابت مورد بازرسي قرار مي‌گيرد. در ابتداي هر بازه، با توجه به منابع در دست و وضعيت اجزا، نوع تعميرات هر جزء مشخص مي‌گردد[۲][۸]. از آنجا كه ممكن است بعضي از اجزاء در دو يا چند بازه بازرسي متوالي احتياج به سرويس نداشته باشند، فاصله بين دو سرويس يک جزء (بازه تعميرات) مي تواند متفاوت باشد. بنابراين در اين روش اجزايي كه نرخ خرابی كمتری دارند، در فواصل زماني طولاني‌تر و آنهايي كه داراي نرخ خرابي بزرگتري هستند در بازه های كوچكتری سرويس می‌شوند. در نتيجه اين سياست امكان برنامه ريزی نت، با انعطاف پذيری بالاتری را فراهم می‌كند. به دليل اين انعطاف پذيری و قابليت تطبيق خوب با سيستم های واقعی، در اين مقاله از اين روش استفاده می‌گردد.

سيستم در نظر گرفته شده در تحقيق حاضر شامل چندين عضو است كه تركيب‌هاي مختلفي از حالتهاي سري-موازي را دارند. هر جزء داراي نرخ خرابي خاصي است كه از توزيع آماري مشخصي پيروي مي‌نمايد. همچنين در تمامي دوره برنامه ريزي، قابليت اطمينان سيستم مي‌بايست بيش از حد معيني باشد. براي اين منظور، اجزا و قطعات سيستم در توالي‌هاي مشخص (نت غير ادواري) مورد بازرسي قرار مي‌گيرند و بر اساس وضعيت آنها و همچنين منابع دردسترس، يكي از اقدامات زير براي آنها صورت مي‌گيرد:

بازرسي جهت اطمينان از صحت اجزا (نوع 1a)

تميز كاري، روغنكاري و ساير سرويس‌هاي جزئي در اين گروه از فعاليت‌هاي نت جاي مي‌گيرند. در بازرسي منابعي استفاده نمي‌شود و تنها عواملي كه باعث بروز خرابي در آينده مي‌شوند، تا حدي برطرف مي‌گردند. اين امر بنوبه خود باعث كاهش سرعت خرابي مي‌گردد.

تعمير و اصلاح اجزا (نوع 1P)

اين نوع فعاليت شامل فعاليت هاي تعميراتي مي‌باشد كه باعث بهبود وضعيت اجزاء و برطرف كردن خرابي‌ها مي‌شوند. اين گروه از فعاليت‌ها باعث بهبود سطح قابليت اطمينان جزء مورد نظر شده ولي آن را به حالت "نو" باز نمي‌گرداند.

جايگزيني اجزا (نوع 2P)

فعاليت‌هايي مانند تعميرات اساسي و جايگزيني قطعات خراب با قطعات جديد از جمله تعميرات نوع2P مي‌باشند. اين نوع از فعاليت نت معمولا وضعيت جزء تعمير شده را به حالت اوليه (كاملا نو) باز مي‌گرداند.

در مدل پيشنهادي، مجموع وزن دهي شده هزينه‌هاي تعميرات پيشگيرانه، تعميرات اتفاقي و هزينه خواب سيستم به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. نتايج محاسباتي، برنامه نت پيشگيرانه را براي هر جز و با توجه به محدوديت‌هاي سيستمي بگونه‌اي تعيين مي‌نمايد، تا ضمن حفظ سطح مشخصي از قابليت اطمينان، مجموع هزينه‌ها كمينه شود.

طراحي و ارائه مدل

سيستم تحت برنامه‌ريزي از زير سيستمهاي سري - موازي (يا موازي - سري) تشكيل شده است. در حالت كلي، در هر زير سيستم عملكرد صحيح k از m عضو براي عملكرد صحيح كل سيستم لازم است. در طول دوره برنامه‌ريزي، اجزا درN بازه زماني، با طول مساوي Tp ، مورد بازرسي قرار مي‌گيرند. بر اساس نرخ خرابي اجزا و اهميت آنها در قابليت اطمينان سيستم، يكي از سه نوع فعاليت نت (1a, 1P, 2P) در مورد آنها انجام مي‌پذيرد. هر يك از اين فعاليتها مستلزم صرف هزينه و منابع مختلفي هستند و در مقابل تاثير متفاوتي در ارتقاء سطح قابليت اطمينان جز مورد نظر (و در نتيجه سيستم) دارند.

هدف اصلي تعيين نوع فعاليت نت براي هر جز در هر بازه زماني بازرسي است بنحوي كه، ضمن حفظ حداقل سطح قابليت اطمينان مورد نياز، مجموع هزينه هاي مرتبط با نت كمينه شوند. در طراحي مدل از نمادها و متغيرهاي زير استفاده شده است:

C^1_{in}: هزينه تعميرات نوع 1P عنصر iام در بازه زماني nام

C^2_{in}: هزينه تعميرات نوع 2P عنصر iام در بازه زماني nام

C^f_n: هزينه ناشي از خرابي هاي اتفاقي سيستم در بازه زماني nام

C_n^{out}: هزينه ناشي از توقف سيستم بـدليل فعاليـت‌هـاى نت در بازه زماني nام

P_{in}^1: مقدار منابع مورد نياز براي تعميـرات نـوع 1P بـراي عنصر iام و در بازه زماني nام

P_{in}^2: مقدار منابع مورد نياز براي تعميـرات نـوع 2P بـراي عنصر iام و در بازه زماني nام

P: تعداد كل منابع در دسترس در دوره برنامه ريزي

$R_{i,0,n}$: قابليت اطمينان عنصر iام در ابتداي بازه nام

$R_{i,f,n-1}$: قابليـت اطمينـان عنصـر iام در انتهـاي بـازه $(n-1)$ام

$R_{i,0}$: قابليت اطمينان اوليه عنصـر iام در شـروع برنامـه-ريزي تعميرات

$R_{s,n}$: قابليت اطمينان كل سيستم در بازه nام

$R_{s,\min}$: حداقل قابليـت اطمينـان مـورد نيـاز بـراي كـل سيستم در دوره برنامه ريزي

m_1 و m_2: ضرايب بهبود قابليت اطمينـان در اثـر اجـراي تعميرات

N: تعداد بازه‌هاى برنامه‌ريزى نت (n=1,…,N)

I: تعداد اجزاء سيستم (i=1,…I)

$$S_n = \begin{cases} 1 & \text{اگر سيستم در بازه nام به دليل تعميرات متوقف شود} \\ 0 & \text{در غير اين صورت} \end{cases}$$

$$X_{in} = \begin{cases} 1 & \text{اگر تعمير نوع1P روي عنصر iام در بازه nام انجام شود} \\ 0 & \text{در غير اين صورت} \end{cases}$$

$$Y_{in} = \begin{cases} 1 & \text{اگر تعمير نوع2P روي عنصر iام در بازه nام انجام شود} \\ 0 & \text{در غير اين صورت} \end{cases}$$

تابع هدف

$$\min Z = \sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I} X_{in} C_{in}^1 + \sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I} Y_{in} C_{in}^2 + \sum_{n=1}^{N} \left(1 - R_{s,n}\right) C_n^f + \sum_{n=1}^{N} S_n C_n^{out} \qquad (۱)$$

محدوديت‌ها

$$R_{s,n} \geq R_{s,\min} \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{I} X_{in} P_{in}^1 + \sum_{i=1}^{I} Y_{in} P_{in}^2 \leq P \qquad \forall n \qquad (۳)$$

$$X_{in} + Y_{in} \leq 1 \qquad \forall n, i \qquad (۴)$$

در مدل فوق، تابع هدف شـامل چهـار مولفـه هزينـه است كه در رابطه (۱) نشان داده شده‌اند. بخش اول و دوم مربوط به فعاليت‌هاي هزينه‌بر تعمير و جايگزيني مي‌باشد. به دليل متفاوت بودن هزينه‌هاي انواع تعميرات، هزينه هر يک (تعمير و جايگزيني) جداگانه لحـاظ و محاسـبه شـده است. بعنوان مثال، اگر در بازه nام براي عنصرiام تعميـرات نوع 1P انجام گيرد، مقدار متغير تصميم گيري X_{in} برابـر يک شده و هزينـه مربـوط بـه تعميـرات نـوع 1P در نظـر گرفته مي‌شود. چنانچه جزء مزبور تعميرات نوع 2P داشته باشد، مقدار متغير تصميم گيري Y_{in} برابر يک مي‌شـود و هزينه مربوط به تعميرات نوع 2P لحاظ خواهد شد. از آنجا كه فعاليت‌هاي نوع 1a در هنگام بازرسي قابل انجام اسـت، در مدل پيشنهادي هزينه هاي ناشي از اين نـوع سـرويس ناچيز فرض شده و از آنها صرفنظر مي شـود. مولفـه سـوم تابع هزينه مربوط به ريسک ناشي از خرابيهاي اتفاقي، كـه باعث خواب سيستم مي شوند، مي‌باشد. اگر چه با افـزايش قابليت اطمينان ($R_{s,n}$)، احتمال خرابي اتفاقي سيستم (1- $R_{s,n}$) كاهش مي‌يابد، ولي اين احتمال در هر حالتي وجود خواهد داشت. در چنين مواقعي، به دليل پيش بيني نشدن تجهيزات و پرسنل مورد نياز براي تعميـرات، هزينـه هـاي بيشتري به سيستم تحميل مي‌شود. همچنين اگـر اجـراي تعميرات برنامه ريزي شده در بازه n باعث خـواب سيسـتم شود، متغير S_n مقدار يک اختيار مي كند و هزينه خـواب سيستم به دليـل تعميـرات برنامـه ريـزي شـده، محاسـبه مي‌گردد. به اين ترتيب، هزينـه هـاي خـواب سيسـتم، بـر اساس علت آنهـا، بطـور جداگانـه در قسـمت‌هـاي سـوم و چهارم لحاظ شده‌اند. در نهايت مقدار تابع هدف با توجه به برنامه نت از مجموع اين هزينه ها محاسبه مي شود.

برنامـه نـت بايـد محـدوديتهاي سيسـتم را نيـز ارضـا نمايند. محدوديت‌هاي مدل شامل حداقل قابليت اطمينان مورد نياز و منابع در دسترس، براي انجام تعميـرات اسـت. حداقل قابليت اطمينان مورد نياز توسط رابطه (۲) تعيـين مي‌شود. قابليت اطمينان سيستم در هر بازه، بـا توجـه بـه قابليت اطمينان هر عنصر و بـا اسـتفاده از روابـط قابليـت اطمينان در شبكه هاي سري-مـوازي، محاسـبه مـي‌شـود [۱۲]. اين مقدار بايد از حداقل قابليت اطمينان مورد نيـاز سيستم $R_{s,\min}$ بزرگتر باشد.

محدوديت دوم در رابطه (٣)، تضمين مـي‌نمايـد كـه مجموع منابع مورد نياز(نيروي انساني، قطعات يدكي و ...)، بيش از منابع موجود نباشد. در ايـن رابطـه، ميـزان منـابع مورد نياز براي تعميرات تمام عناصر در هـر بـازه محاسـبه مي شود كه بايد كوچكتر از منـابع در دسـترس P، باشـد. تعميرات نوع 1P مقدار P_{in}^{1} و تعميرات نوع 2P مقدار P_{in}^{2} از منابع را استفاده مي‌كند. براي انجام بازرسي يا تعميرات نوع 1a منابعي مصرف نمي‌شود. محدوديت سوم در رابطـه (۴)، بمنظور حصول اطمينان از تخصيص تنها يک فعاليت نت به هر جزء در هر بـازه زمـاني بازرسـي اسـت. بعبـارت ديگـر، در هـر دوره زمـاني، بـراي هـر جـزء تنهـا يكـي از فعاليت‌هاي تعميراتي 1P يا 2P را مي‌توان در نظر گرفـت. چگونگي ارزيابي قابليـت اطمينـان سيسـتم تحـت برنامـه ريزي نت در قسمت بعد تشريح شده است.

قابليت اطمينان در سيسـتم تحـت تعميـرات پيشگيرانه

در ايـن تحقيـق، يكـي از كـاربردي‌تـرين روشـهاي محاسـبه قابليـت اطمينـان مـورد اسـتفاده قـرار مـي‌گيرد[١][١٣]. همچنين تابع توزيع وايبال براي نمايش نرخ خرابي اجزا بكار گرفته شده است. توزيـع وايبـال داراي دو (و در بعضي موارد سه) پارامتر تنظيمي است كه بـا تغييـر مقادير آنها ميتوان اكثر توزيع‌هاي آماري را بيان نمود. اين انعطاف پذيري، امكـان تحليـل قابليـت اطمينـان را بـراي طيف وسيعي از تجهيزات و قطعات، با توزيـع‌هـاي آمـاري مختلف، پديد مي‌آورد. بديهي اسـت كـه در مـدل و روش حل پيشنهادي، استفاده از ساير توزيع‌هـاي آمـاري كـاملا امكان پذير است.

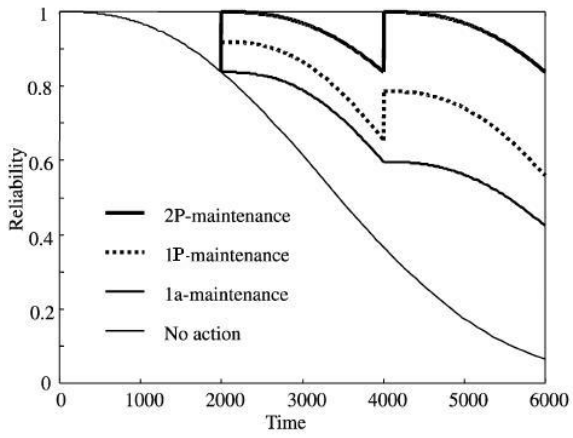
به بطور كلي قابليت اطمينان هر جز از يك سيسـتم، كه خرابي آن از توزيع وايبال با پارامترهاي مقياس و شكل θ و β پيـروي مـي‌كنـد، از معـادلات زيـر بدسـت مي‌آيد[١٣]:

$$R_{i,0,n} = R_{i,f,n-1} + m_2(R_{i,0} - R_{i,f,n-1}) \qquad \forall n,i \tag{۵}$$

$$R_{i,n}(t) = R_{i,0,n} e^{-\left[\frac{\left(1/_{m1}\left(t-(n-1)t_p\right)\right)}{\theta}\right]^{\beta}} \qquad \forall n,i \tag{۶}$$

در فرمول هاي فوق، $R_{i,0,n}$ قابليت اطمينان عنصر iام در ابتداي بازه nام، $R_{i,f,n-1}$ قابليت اطمينان عنصر iام در انتهاي بازه (n-1)ام و $R_{i,0}$ قابليت اطمينان اوليه عنصر iام در شروع دوره برنامه ريزي، مي‌باشند.

هر يـک از فعاليتهـاي تعميراتـي 1a، 1P و 2P تـاثير متفاوتي بر روي قابليت اطمينان اجزاء دارنـد. ميـزان ايـن تاثيرات توسط ضرايب بهبود m_1 و m_2 تعيين مي‌شـود. ضرايب مزبور مقادير بين صفر و يک را مـي‌تواننـد اختيـار كنند و با توجه به روابط (۵) و (۶)، افـزايش مقـادير آنهـا تاثير فعاليت تعميراتي را بيشتر مي‌كند. سرويس نـوع 1a حداقل تـاثير را بـر روي قابليـت اطمينـان داشـته و تنهـا سرعت خرابـي را كـاهش مـي‌دهـد. بنـابراين مقـدار m_1 عددي بين صفر و يـک و مقـدار m_2 برابـر صـفر در نظـر گرفته مي‌شود. در تعميرات نوع 1P مقدار m_1 و m_2 بين صفر و يک در انتخاب مي‌شود. در تعميرات نوع 2P هـر دو مقادير m_1 و m_2 برابر يک قـرار مـي‌گيـرد و در نتيجـه قابليت اطمينان جزء تحت تعمير به حالت "نو" بازگردانـده خواهد شد. چگونگي تـاثير فعاليـت‌هـاي مختلـف نـت بـر قابليت اطمينان در شكل (١) نشان داده شده است.



شكل١: تغيير قابليت اطمينان سيستم بر اثر تعميرات مختلف.

به اين ترتيب بعد از محاسبه قابليت اطمينـان اجـزا، توسط روابط قابليت اطمينان در سيستم‌هاي سري-موازي، قابليت اطمينان كل سيستم محاسبه مي‌شود.

روش حل

روشهاي حـل سـنتي و اسـتاندارد در مسـائل بهينـه سازي صنعتي واقعي، بدليل تعدد متغيرها و بزرگي فضاي

جواب‌ها، غالبا کارايي لازم را نداشته و مستلزم صرف زمانهاي محاسباتي طولاني هستند[۱۴]. در چند دهه اخير، محققان براي حل اين مشکل، با الهام گرفتن از پديده‌هاي نظام‌مند طبيعت، الگوريتم‌هاي متعددي طراحي و پيشنهاد نموده‌اند. خوشبختانه، با پيشرفت فن‌آوري کامپيوتر و ارتقاء قابليت‌هاي محاسباتي، امروزه استفاده از روشهاي ابتکاري و جستجوگرهاي هوشمند کاملاً متداول گرديده است[۱۵]. از جمله الگوريتم‌هاي جستجوگر، ميتوان به جستجوگر ممنوعه[۱۲] و تبدريد تدريجي[۱۳] اشاره نمودکه در اين تحقيق، براي حل مدل پيشنهادي، بکار گرفته شده‌اند. در ادامه ساختار و چگونگي عملکرد اين الگوريتم‌ها به اختصار تشريح شده و سپس نحوه انطباق آنها بر مسئله مورد نظر ارائه مي‌گردد.

الگوريتم تبريد تدريجي (SA)

اين جستجوگر اولين بار توسط کرک پاتريک و همکارانش [۱۶]، در سال ۱۹۸۳ برای حل مسائل بهينه‌سازی استفاده شد. اين الگوريتم، فرآيند تبريد و انجماد مواد مذاب را شبيه سازي مي‌کند. در حالت مذاب، بدليل دماي بالا، اتم ها بصورت آزاد و بي‌نظم در حرکت مي‌باشند. با کاهش تدريجي دما، اتم‌ها با قرار گرفتن در يک شبکه کريستالي منظم به حالت جامد درآمده و در پايين ترين سطح انرژي قرار مي‌گيرند.

چنانچه در اين فرآيند، عمل تبريد به اندازه کافی کند صورت گيرد، در هر دمای T، هر ذره از جسم، با احتمال Pr فرصتِ رسيدن به يک تعادل گرمايی را پيدا می‌کند. اين احتمال توسط توزيع بلتزمن[۱۴] نشان داده شده در رابطه (۷)، تعيين می‌گردد:

$$\Pr = \frac{1}{Z(T)}.\exp(-\frac{\Delta E}{k_B T})$$

(۷)

در رابطه فوق $Z(T)$ (معروف به تابع پارتيشن[۱۵]) يک ضريب نرماليز کننده وابسته به دما است؛ k_B ثابت بلتزمن و عبارت $\exp(-\frac{\Delta E}{k_B T})$ فاکتور بلتزمن[۱۶] می‌باشد.

وقتی که دما کاهش می‌يابد، توزيع بلتزمن روی حالتهايی با کمترين انرژی متمرکز می‌شود و نهايتاً وقتی دما به صفر می‌رسد، فقط حالتهايی با مينيمم انرژی دارای احتمال غير صفر می‌باشند. به اين فرآيند سرد کردن تدريجی فلزات و آلياژها، آنيل کردن[۱۷] گفته مي‌شود.

لازم به ذکر است در صورت تبريد سريع، اتمها بصورت بي‌نظم منجمد شده و در نتيجه پايين‌ترين سطح انرژي حاصل نخواهد شد. بعبارت ديگر، اگر سردکردن خيلی سريع صورت پذيرد و به جسم جامد اجازه رسيدن به تعادل گرمايی در هر دما داده نشود، جسم جامد داراي ساختاری بی‌نظم و کم‌ثبات، که دارای انرژی بالاتری نسبت به ساختارهای شبکه‌ای کريستالی است، خواهد بود.

در الگوريتم SA، مقدار تابع هدف متناظر با سطح انرژي ذرات و پارامتر کنترلی T متناظر با دماي سيستم، در نظر گرفته ميشود. احتمال قبولي جواب جديد، با استفاده از تابع احتمالي حرکت[۱۸] که متناظر با توزيع بلتزمن است، بيان مي شود. به اين ترتيب الگوريتم، با ايجاد و ارزيابي جوابهاي متوالي، بصورت گام به گام بسمت جواب بهينه حرکت مي‌کند. براي هر حرکت، يک همسايگي جديد بصورت تصادفي ايجاد و ارزيابي مي‌شود. حرکت به جواب جديد در صورتيکه جواب جديد از جواب فعلي بهتر باشد و يا مقدار تابع احتمال حرکت از يک عدد تصادفي از دامنه (۱و۰] بزرگتر باشد، انجام خواهد يافت. در غير اين صورت جستجوگر جواب جديد ديگري را توليد و ارزيابي خواهد نمود. اين حرکت گام‌به‌گام تا ارضاء شرط توقف الگوريتم (تعداد تکرارها، زمان محاسبات، و ...) ادامه مي‌يابد. تابع احتمالي حرکت و کاهش دما به صورت زير تعريف مي‌شوند[۱۷]:

$$P(pm_i \rightarrow pm_{i+1}) = \exp(-\frac{\Delta C_i}{T_i})$$

(۸)

$$T_i = \alpha T_{i-1} \qquad 0\langle\alpha\langle 1$$

(۹)

نمادهاي استفاده شده در فرمولهاي فوق عبارتند از:

$\mathrm{pm_i}$: جواب در حرکت iام

$\mathrm{pm_{i+1}}$: جواب جديد (کانديد) براي حرکت (i+1)ام

ΔC_i: تغيير مقدار تابع هدف در صورت حرکت به جواب جديد

T_i: درجه حرارت در حرکت iام

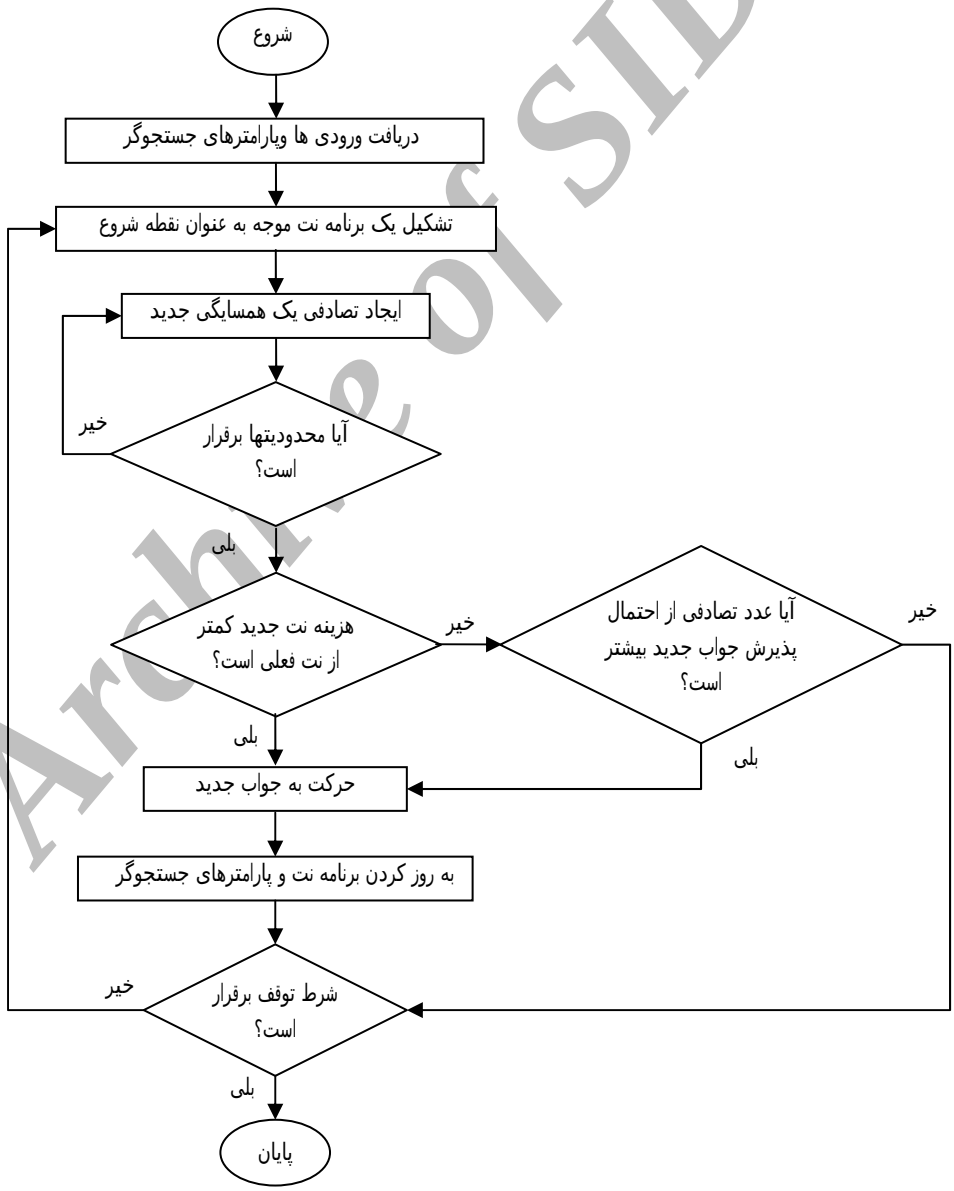
$P(pm_i \rightarrow pm_{i+1})$: احتمال حرکت به جواب جديد در حرکت (i+1)ام

α : نرخ کاهش دما

معمولاً درابتدای جستجو، مقدار دمای اولیه، بزرگ انتخاب می‌شود، بطوریکه الگوریتم شانس بیشتری برای حرکت و جستجوي مناطق جدید را داشته باشد. ولی با افزایش تعداد حرکتها این دما برطبق یک تابع زمانبندی سرمایش به تدریج کم می‌شود. درنتیجه، احتمال انتخاب جوابهای بدتر با افزایش تعداد حرکتها کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر، در ابتدای جستجو، نقش طبیعتِ تصادفی الگوریتم در پذیرش همسایگی جدید بیشتر از نقش قطعی آن است. ولی با پیشرفت جستجو، حرکتها بیشتر براساس بهبود تابع هدف انجام شده و نقش طبیعت تصادفی الگوریتم در پذیرش جواب جدید کاهش می‌یابد.

محدودیت مهم الگوریتم تبرید تدریجی وجود پارامترهای انتخابی متعددی است که در عملکرد الگوریتم تاثیر زیادی دارد. مقادیر این پارامترها باید با دقت انتخاب شوند. همچنین ماهیت تصادفی این الگوریتم باعث ارائه جوابهای متفاوت در اجراهای متعدد برای یک مسئله خاص خواهد شد. ولی بدلیل همین ماهیت تصادفی، این الگوریتم برای مسائلی که فضای جواب‌های آن بزرگ بوده و دارای چندین بهینه محلی هستند بسیار موثر عمل مینماید.

مراحل كلي الگوريتم SA براي حل مسئله برنامه ريزي نت در شكل (٢) ارائه شده است.



شکل۲: فلوچارت الگوریتم تبرید تدریجی.

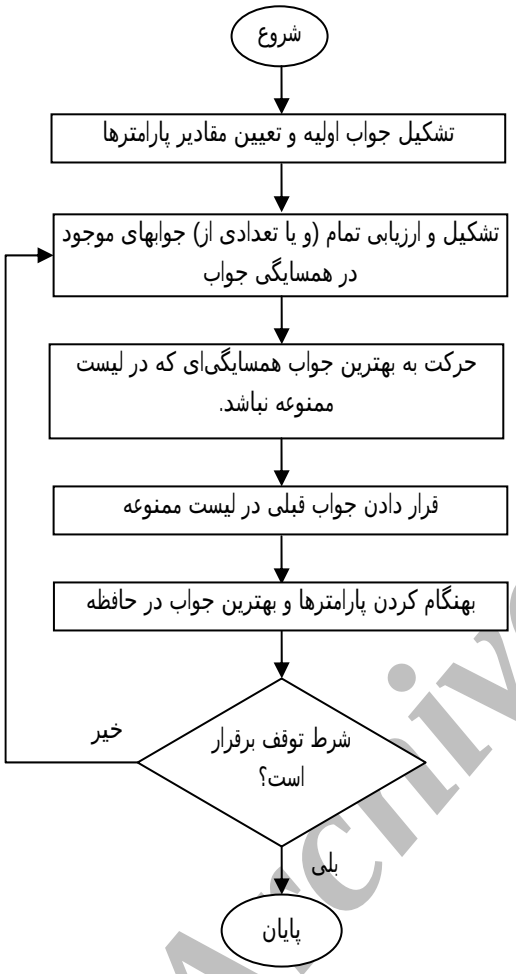
الگوریتم جستجوگر ممنوعه (TS)

الگوریتم TS یکي از جستجوگرهاي همسایگي است که اولین بار توسط گلور[۱۸]، در سال ۱۹۸۶ براي حل مسائل بهینه‌سازي ترکیبي استفاده شد. روند جستجو به این ترتیب است که الگوریتم از یک جواپ موجهِ مسأله شروع به حرکت نموده و پس از تشکیل و ارزیابي جوابهاي موجه در همسایگي جواب فعلي به بهترین آنها حرکت مي‌کند. این حرکت، قدم به قدم جستجوگر را به سمت جواب بهینه یا نزدیک به بهینه هدایت مي‌نماید. چگونگي ایجاد و ارزیابي همسایگي تأثیر مهمي بر عملکرد الگوریتم TS دارد. جابجایي دو به دو[۱۹] و جابجایي کشویي[۲۰] از متداولترین روشهاي ایجاد همسایگي مي باشند. با اینحال مطالعات نشان داده است که جابجایي دو به دو باعث عملکرد بهتر الگوریتم مي‌شود[۱۹]. بنابراین، در تحقیق حاضر نیز از این مکانیزم براي ایجاد همسایگي استفاده شده است.

مشخصه بارز الگوریتم TS، توانایي آن در گریز از بهینه‌هاي محلي است. این توانایي از دو ویژگي ناشي مي‌شود. اول اینکه در هر حرکت بهترین جواب را از میان همسایگي جواب فعلي مي پذیرد. چنین جوابي ممکن است بهتر و یا بدتر از جواب فعلي باشد. مشخصه دوم جستجوگر TS، حافظه کوتاه مدت آن مي‌باشد، که به لیست ممنوعه معروف است. این لیست شامل تعدادي از حرکتهاي اخیر جستجوگر است که اجازه رجوع به آنها در حرکت فعلي وجود ندارد. پس از انجام هر حرکت، جواب فعلي در بالاي لیست ممنوعه قرار گرفته و چنانچه لیست پر باشد، قدیمي ترین جواب لیست از آن خارج مي گردد. این دنباله از جوابهاي ممنوعه به همراه قابلیت قبول جوابهاي بدتر، جستجوگر را تا حد زیادي از حبس شدن در بهینه هاي محلي حفاظت مي‌نماید.

با اینحال از آنجا که معمولا تمامی همسایگی در روش TS میبایست ایجاد و ارزیابی شود، این الگوریتم معمولا نسبت به روش SA کندتر عمل مینماید. این مشکل با بزرگ شدن ابعاد مسئله شدیدتر خواهد شود؛ زیرا در الگوریتم TS اندازه همسایگي با ابعاد مسئله تناسب مستقیم دارد.

معیارهاي متعددي براي توقف جستجو در TS وجود دارد. حداکثر تعداد حرکتها، زمان محاسبات و یا حداکثر تعداد حرکت‌هاي غیر بهبود دهنده، از معیارهاي متداول استفاده شده است. توضیحات مبسوط در خصوص این الگوریتم را میتوان در مراجع مرتبط از جمله [۱۹][۲۰] یافت. فلوچارت کلي الگوریتم جستجوی ممنوعه در شکل(۳) را نشان داده شده است. در ادامه بمنظور نمایش عملکرد روش‌هاي پیشنهادي یک مثال عددي ارائه و تحلیل مي‌گردد.



شکل ۳: فلوچارت الگوریتم جستجوی ممنوع.

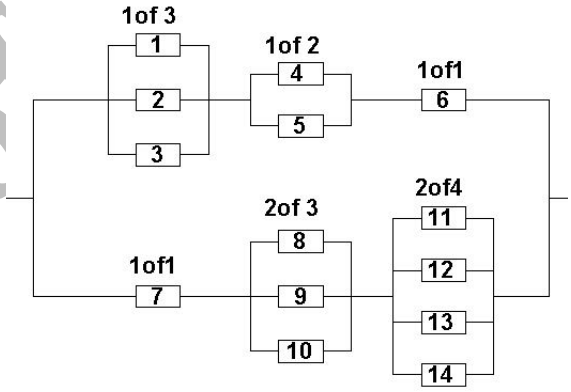
مثال عددي و نتایج محاسباتي

براي نشان دادن کارآیي مدل و روش حل ارائه شده, سیستمي مختلط از نوع سري-موازي شامل ۱۴ جزء در نظر گرفته شده است. یك سیستم سري-موازي شامل زیر مجموعه‌هایي است که به صورت سري به یکدیگر متصل شده اند، ولي ارتباط اجزا در هر زیر مجموعه از نوع موازي است. لازم به ذکر است که هر چیدمان دیگري نیز توسط مدل و روش حل ارئه شده قابل تحلیل است.

سیستم نشان داده شده در شکل (٤)، از نوع سري- موازي k از m است، که شامل دو زیر سیستم موازي مي‌باشد. هر یک از این دو زیر سیستم خود مشتمل بر سه مجموعه سري است که از تعدادي اجزاي موازي تشکیل شده‌اند. حداقل تعداد اجزاي سالم، براي عملکرد صحیح هر زیر سیستم، در بالاي آن نشان داده شده است. به عنوان مثال، از سه عضو ۸، ۹ و ۱۰، عملکرد حداقل دو جز لازم است. نرخ خرابي اجزاء از توزیع وایبل با پارامترهای خاص هر جزء پیروي مي‌کنند.

برخي از داده‌هاي مورد نیاز براي حل این مثال از مرجع [۱۳] اخذ شده‌اند. سایر اطلاعات استفاده شده تنها بعنوان مثال آورده شده و در صورت وجود داده‌های واقعی می‌توان آنها را جایگزین نمود.

در این مثال، مقادیر پارامترهای مقیاس بین ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ و پارامتر شکل بین ۲/۵ تا ۳ تعیین شده‌اند[۱۳].



شکل ٤: ساختار سیستم سري- موازي براي مسئله برنامه ریزی نت.

هزینه تعمیرات، بر حسب نوع آن، براي اجزاء مختلف، متفاوت بوده و در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین هزینه‌هاي تعمیرات نوع 2P، دو برابر نوع 1P لحاظ مي‌شوند. هزینه خرابی اتفاقی، هزینه خواب سیستم، منابع مورد نیاز برای تعمیرات و ضریب بهبود تعمیرات در جدول (۲) ارائه شده است. برنامه ریزی برای یک دوره ۱۰ ماهه، با بازه‌های بازرسي ماهانه صورت مي‌گیرد. حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز در طي دوره برنامه‌ریزی، ۹۰% در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، فعالیت‌های نت مي‌بایست بگونه‌ای انجام گیرند که قابلیت اطمینان سیستم در طول بازه‌هاي متوالي همواره از مقدار تعیین شده ۹۰% بیشتر باشد.

جدول۱ : هزینه هاي انواع تعمیرات (هزینه تعمیرات نوع 2P دو برابر نوع 1P در نظر گرفته شده).

ایستگاه	هزینه تعمیرات 1P
۱	٤٥
۲	۱٥
۳	۲٥
۴	۳٥
۵	۳۰
۶	۳۹
۷	۳۰
۸	۲۰
۹	۲٥
۱۰	۱٥
۱۱	٦۰
۱۲	۵۰
۱۳	۳۰
۱۴	۲۰

جدول۲ : هزینه هاي خرابي اتفاقي و خواب سیستم و منابع مورد نیاز.

هزینه خرابي اتفاقي	۵۰۰
هزینه خواب	۳۰۰
منابع مورد نیاز تعمیر نوع 1P	۱
منابع مورد نیاز تعمیر نوع 2P	۲
ضریب بهبود 1a (m_1)	۱
ضریب بهبود 1P (m_2)	۰/۵
حداقل قابلیت اطمینان	۰/۹

با توجه به ساختار سیستم و داده‌های ارائه شده، هدف تعیین نوع تعمیرات برای هر جزء در هر یک از بازه‌های زماني است بگونه‌ای که ضمن حفظ قابلیت اطمینان مورد نیاز، مجموع هزینه‌های تعمیراتی کمینه شود.

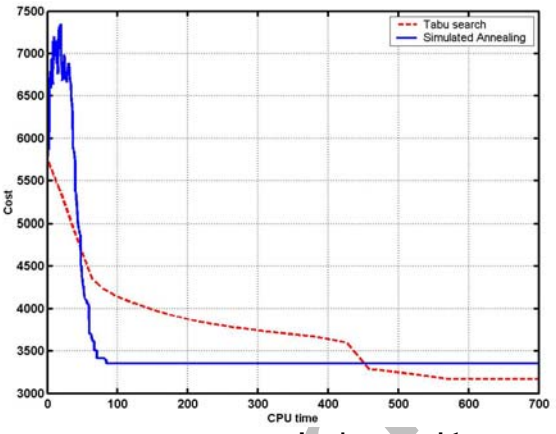
مسئله فوق برای دو روش SA و TS، به زبان MATLAB کدنویسي شده و بر روی یک کامپیوتر P1800 اجرا گردید. بمنظور مقایسه نتایج، مدت زمان اجرا برای هر دو الگوریتم ۱۲ دقیقه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است، نتایج محاسباتي به ازای بهترین مقادیر بدست آمده برای پارامترهای هر الگوریتم ارائه شده‌اند. شکل (۵) نمودار بهبود تابع هدف در مقابل زمان محاسباتي را برای هر دو روش نشان مي‌دهد.

همانطور که از شکل (۵) پیداست، پس از ۱۰ دقیقه تغییری در کیفیت جوابها ایجاد نشده است. با اینحال، الگوریتم تبرید تدریجي از سرعت همگرايي بسيار خوبی برخوردار است بطوریکه در ۱۰۰ ثانیه اول جستجو به جواب نهايي ميل مي‌كند. نوسانات اوليه در منحني بهبود الگوریتم SA بدلیل بزرگ بودن دمای اولیه و در نتیجه بالا بودن احتمال قبولي جوابهای بدتر در ابتدای جستجو است. در مقابل جستجوگر ممنوعه، علي رغم سرعت همگرايي كمتر، در زمانهای طولاني جستجو، جواب‌های بهتری را ارائه مي‌دهد. دليل اين امر مكانيزم تشكيل و ارزيابي همسايگي در اين الگوريتم‌ها است. در روش SA برای هر حرکت، تنها یک جواب جدید بصورت تصادفي در همسايگي جواب فعلي تشكيل و ارزيابي مي‌شود. اين بنوبه خود باعث تسريع حركت جستجوگر به تمامي مناطق فضای جوابها مي‌شود. در حاليكه الگوريتم TS دارای ماهيت كاملا قطعي است و هر حركت آن مستلزم تشكيل و ارزيابي تمامي جوابها در همسايگي جواب فعلي مي‌باشد. كيفيت خوب جوابها در طولاني مدت براي روش TS نيز بدليل همين جستجوی كامل همسايگي است.

دو الگوريتم SA و TS از توانايي مطلوبي در حل مسئله برخوردار هستند. انتخاب هر يك تا حد زيادي به طراح و برنامه‌نويس وابسته است. اما به طوركلي، برای مسائل بزرگ و يا در مواقعی كه سرعت محاسباتی بالايي نياز می‌باشد، الگوريتم SA پيشنهاد می گردد. در مسائل كوچک و يا در مواقعی كه كيفيت خوب جوابها مدنظر باشد، الگوريتم TS مناسب بنظر ميرسد. از آنجايي كه مسئله موردنظر برنامه‌ريزي و طراحي برنامه نت برای بازه طولانی است و براي تهيه برنامه نت تنها يكبار اجراي الگوريتم كفايت مي نمايد، استفاده از الگوريتم TS بدليل كيفيت بهتر جوابها مناسب خواهد بود.

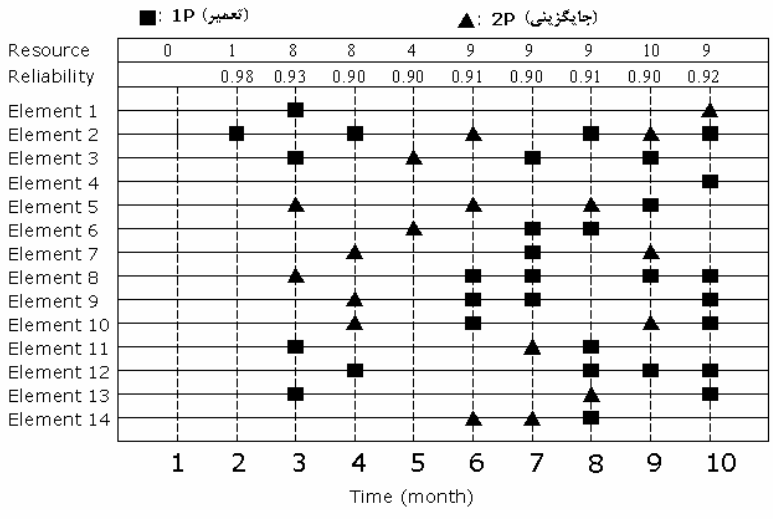
براساس نتايج محاسباتي، برنامه نگهداري و تعميرات براي دوره ۱۰ ماهه بهمراه قابليت اطمينان سيستم و منابع مورد نياز در هر دوره بازرسي ماهانه در جدول (۳) ارائه شده است.

طبق نمودار شكل (۵)، هزينه‌هاي نت از۵۷۰۰ واحد در برنامه ابتداي، به ۳۲۰۰ در برنامه نهايي كاهش يافته است. از آنجا كه منابع و محدوديتها نيز براي كل سيستم تعريف شده‌اند و بهينه‌سازي برنامه نت براي تمام سيستم انجام مي‌گيرد، بنابراين بر اساس منابع در دسترس، قابليت اطمينان مورد نياز و وضعيت ديگر اجزا، تعميرات متفاوتي براي هر جز پيشنهاد مي‌گردد.



شكل ۵ : تغييرات تابع هزينه در SA و TS.

جدول ۳: برنامه تعميرات براي سيستمي با ۱۴ جزء .



در جدول (۳)، علامت ■ نشان دهنده تعميرات نوع 1P يا تعميرات اصلاحي و علامت ▲ نشان دهنده تعميرات نوع 2P يا جايگزيني هستند. در موارد ديگر كه اين دو علامت استفاده نشده است، بازرسي اجزاء (فعاليت نوع 1a) كفايت مي كند. بر طبق جدول فوق، نوع فعاليت نت پيشگيرانه براي هر جزء و در هر بازه زماني، مشخص مي‌شود. به طور مثال در اولين دوره بازرسي، بعلت "نو" بودن سيستم به هيچگونه تعمير يا جايگزيني پيشگيرانه نيازي نيست. به همين ترتيب در ابتداي بازه دوم، تنها انجام تعميرات اصلاحي بر روي جز دوم لازم است. ولي در بازه سوم، اجزاء ۱، ۳، ۱۱ و ۱۳ مي‌بايست تعمير شده و اجزاء ۵ و ۸ جايگزين شوند. در اين بازه جمعا ۸ واحد از منابع مصرف مي‌شوند تا قابليت اطمينان سيستم بميزان ۹۳% تامين شود. بدين ترتيب، روند حفظ قابليت اطمينان در سطح مورد نياز تا انتهاي دوره برنامه ريزي ادامه مي‌يابد.

بحث و نتيجه گيري

تعميرات و نگهداري پيشگيرانه نقش مهمي در كاركرد مطلوب و بدون وقفه سيستمهاي صنعتي و توليدی دارند. با اين حال، فعاليتهاي نت هزينه بر بوده و مستلزم صرف منابع محدود هستند. ارائه برنامه بهينه نت علاوه بر تامين سطح قابليت اطمينان مورد نياز سيستم، در كاهش هزينه هاي مستقيم و غير مستقيم نت نيز موثر خواهد بود. در اين مقاله مدلي جامع، با در نظر گرفتن پارامترهاي مهم برنامه ريزي نت براي يك سيستم چند عضوي مختلط ارائه گرديد. در مدل پيشنهادي هزينه‌هاي مرتبط با نگهداري و تعميرات شامل هزينه خرابي اتفاقي، خواب تجهيزات و هزينه هاي مستقيم فعاليتهاي نت لحاظ شده‌اند. همچنين محدوديتهاي سيستمي از قبيل منابع دردسترس و حداقل قابليت اطمينان مورد نياز در نظر گرفته شده‌اند. بمنظور حل سريع مدل پيشنهادي، از دو الگوريتم تبريد تدريجي و جستجوگر ممنوعه استفاده شده و نتايج حاصل مقايسه گرديد. نتايج محاسباتي نشان مي‌دهند كه در زمانهاي كوتاه محاسباتي الگوريتم تبريد تدريجي و در زمانهاي طولاني‌تر جستجوگر ممنوعه از عملكرد بهتري برخوردارند. دليل اين امر چگونگي تشكيل و ارزيابي همسايگي در اين دو الگوريتم است كه قبلا به آن اشاره رفته است. نكته قابل توجه در نتايج محاسباتي اين واقعيت است كه براي پريودهاي ثابت بازرسي، نوع فعاليت نت براي اجزاء مختلف مي‌تواند كاملا متفاوت باشد. به بيان ديگر، از آنجا كه در طراحي و بهينه سازي برنامه نت كل سيستم در نظر گرفته شده است، هر جز در بازه هاي زماني مختلف ممكن است مورد تعميرات متفاوتي قرار گيرد. از ديگر نكات مورد توجه در انجام اين تحقيق، چگونگي طراحي مدل و روش حل پيشنهادي است كه كاملا انعطاف پذير بوده و با تغييرات جزيي براي هر نوع سيستمي قابل انطباق و پياده سازي مي‌باشند.

با اين وجود، در مدل پيشنهادی به برخي از مسائلی كه ميتوانند زمينه تحقيقات آتي باشند، پرداخته نشده است. از آن جمله ميتوان به لحاظ نشدن تاثير برخی از واحدهای مرتبط، بخصوص برنامه‌ريزی توليد، در مدلسازی سيستم اشاره نمود. در همين راستا، ملاحضات فصلی و زمانی نيز در برنامه نت بسياری از سيستمهای توليدی و صنعتی، مانند نيروگاه‌ها و كارخانجات فرآوری مواد غذايي، اثرگذارند. اين موضوع نيز ميتواند در مطالعات آينده مورد بررسی بيشتری قرارگيرد. يكی ديگر از مسائلی كه ميتواند كاربردی كردن اين مدل، و ساير مدلهای بهينه سازی را با چالش مواجه نمايد، عدم وجود داده‌های مستند و دقيق برای بهينه سازی است. اين امر ميبايست از طرف سازمانها و صنايع مرتبط مورد توجه قرار گيرد.

مراجع

1 - Ramakumar, R. (1993). *Reliability Engineering: Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, ISBN 0-13-276759-7.

2 - Tsai, Y. T., Wang, K. S. and Teng, H. Y. (2001). "Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms." *Reliability Engineering System Safety*, Vol. 74, PP. 89-97.

3 - Lie, C. H. and Chun, Y. H. (1986). "An algorithm for preventive maintenance policy." *IEEE Trans Reliab* Vol. 35, No. 1, PP.71-5.

4 - Wang, H. (2002). "A survey of maintenance policies of deteriorating systems." *European Journal of Operational Research*, Vol. 139, PP. 469–489.

5 - Barlow, R. E. and Hunter, L. C. (1960). "Optimum preventive maintenance policies." *Operation Research*, Vol. 8, PP. 90-100.

6 - Bris, R., Chatelet, E. and Yalaoui, F. (2003). "New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 82, PP. 247-255.

7 - Samrout, M., Yalaoui, F., Chatelet, E. and Chebbo, N. (2005). "New methods to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems using ant colony optimization." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 89, PP. 346–354.

8 - Lapa, C., Pereira, C. and Mol, A. C. (2000). "Maximization of a nuclear system availability through maintenance scheduling optimization using a genetic algorithm." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 196, PP.219-231.

9 - Mercier, S. (2002). "A preventive maintenance policy with sequential checking procedure for a Markov deteriorating system." *European Journal of Operational Research*, Vol. 147, PP. 548–576.

10- Kolahan F. and Doostparat M. (2006). *Application of simulated annealing algorithm in optimal preventive maintenance planning, 3rd Technical Conference in Maintenance*, Tehran, Iran. (In Persian).

11 - Lapa, C., Pereira, C. and Frutuoso, P. F. (2003). "Surveillance test policy optimization through genetic algorithms using non periodic intervention frequencies and considering seasonal constraints." *Reliability Engineering System Safety*, Vol. 81, PP. 103-109.

12- Haj Shirmohamadi, A. (1998). *Maintenance and repair planning (Technical management in industry)*, Azle Esfehan Publication Inc. (In Persian).

13 - Tsai, Y. T., Wang, K. S. and Tsai, L. C. (2004). "A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 84, PP. 261-270.

14 - Jones, D. F., Mirrazavi, S. K. and Tamiz, M. (2002). "Multi-objective meta- heuristic: An overview of the current state-of-the-art." *European Journal of Operational Research*, Vol. 137, PP. 1-9.

15 - Eshraghnya R., Modir Shanehchy S. and Rajabi Mashhadi H. (2006). *Maintenance schedueling of manufacturing companies in a competitive environment using genetic algorithm., 3rd Technical Conference in Maintenance*, Tehran, Iran. (In Persian).

16 - Kirkpatrick, Gelatt, J. and Vecchi, D. D. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*, PP.220, 671.

17 - Laarhoven, P. J. M. and Aarts, E. H. L. (1998). *Simulated annealing: Theory and applications*, Kluwer Academic Publishers.

18 - Glover, F. (1990). *Tabu search: A tutorial, Interfaces*, Vol. 20, PP. 74-94.

19 - Kolahan, F. and Liang, M. (1998). "An adaptive TS approach to JIT sequencing with variable processing times and sequence-dependent setups." *European Journal of Operational Research*, Vol. 109, PP. 142-159.

20 - Gopalakrishnan, M. (2001). "A tabu search heuristic for preventive maintenance scheduling." *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 40, PP.149-160.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Reliability
2 - Corrective Maintenance
3 - Preventive Maintenance
4 - Minimal Repair
5 - Corrective Replacement
6 - Simple Préventive Maintenance
7 - Preventive Replacement
8 - Down time
9 - Availability
10 - Genetic Algorithm
11 - Hazard Rate
12 - Tabu Search
13 - Simulated Annealing
14 - Boltezman Distribution
15 - Partition Function
16 - Boltezman Factor
17 - Annealing
18 - Transition Probability
19 - Pairwise Interchange
20 - Extraction and Insertion