

زمان‌بندی آگاه به اوج توان در سامانه‌های بحرانی-مختلط سه سطحی چند هسته‌ای

شایان شکری^۱، محراب طوقانی^۱، ساره ملکی^۱، سپیده صفری^۲، شاهین حسابی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران،

{shokri, sareh.maleki78, mehrab.toghani79}@sharif.edu

^۲ محقق پسادکتری، پژوهشکده علوم کامپیوتر، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران

sepideh.safari@ipm.ir

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

hessabi@sharif.edu

چکیده

۱- مقدمه

امروزه با ظهور و گسترش سامانه‌های رایفیزیکی، توجه به طراحی سامانه‌های بحرانی-مختلط^۱ و حل چالش‌های این سامانه‌ها اهمیت ویژه‌ای یافته است. این سامانه‌ها از وظایف با چندین سطوح بحرانی مختلف تشکیل شده‌اند. با توجه به اجرای همزمان وظایف با درجه‌های بحرانی مختلف بر روی بستر سخت‌افزاری مشترک این سامانه‌ها، زمان‌بندی وظایف به صورتی که محدودیت‌های مختلف مانند زمان، دما و توان نقض نشود، امری حیاتی است. همچنین با پیشرفت فناوری ساخت، میزان توان مصرفی این سامانه‌ها نیز افزایش یافته است. افزایش توان مصرفی در سامانه‌های بحرانی-مختلط می‌تواند باعث افزایش دما و در نتیجه آسیب به سامانه شود. برای این منظور در این مقاله یک روش زمان‌بندی آگاه به اوج توان مصرفی برای سامانه‌های بحرانی-مختلط سه سطحی چند هسته‌ای ارائه شده است تا علاوه بر اجرای وظایف با درجه بحرانی زیاد^۲ پیش از موعود زمانی آن‌ها، توان سامانه نیز از حد مشخصی که توان طراحی حرارتی^۳ نامیده می‌شود، فراتر نرود. در این مقاله، پس از ارائه روش نگاشت وظایف بر روی هسته‌ها و سپس تخصیص وظایف به هسته‌ها، به ارائه یک روش زمان‌بندی جدید برای وظایف بر اساس سطوح بحرانی آن‌ها پرداخته شده است. لازم به ذکر است هرگاه در حین زمان‌بندی، توان مصرفی سامانه بالاتر از توان حرارتی طراحی برود طبق مکانیزم‌های ارائه شده، اجرای وظیفه را متوقف کرده و از زمانی که این محدودیت نقض نشود اجرای آن از سر گرفته می‌شود. روش پیشنهادی ارائه شده با چند روش زمان‌بندی دیگر در سامانه‌های بحرانی-مختلط مقایسه شده است و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از نظر امکان زمان‌بندی و اجرای وظایف نسبت به روش‌های پیشین ۲۷٪ بهتر عمل می‌کند.

کلمات کلیدی

سامانه‌های بحرانی-مختلط سه سطحی، مدیریت اوج توان، توان حرارتی طراحی، نگاشت و زمان‌بندی وظایف بحرانی-مختلط

در سامانه‌های بحرانی-مختلط، وظایف با درجه‌های بحرانی مختلف بر روی یک بستر سخت‌افزاری مشترک به منظور کاهش هزینه، مساحت و توان مصرفی اجرا می‌شوند [1]. این سامانه‌ها از چندین سطح بحرانی مختلف تشکیل شده‌اند که یکی از شناخته‌شده‌ترین نوع از این سامانه‌ها، سامانه‌های بحرانی-مختلط دو سطحی است، که در آن وظایف به دو دسته مختلف یعنی وظایف با درجه بحرانی زیاد و کم تقسیم می‌شوند. یکی از انواع پیچیده‌تر سامانه‌های بحرانی-مختلط، سامانه‌های سه سطحی هستند که تا کنون در پژوهش‌های صورت گرفته توجه کمتری به آن شده است. در سامانه‌های بحرانی-مختلط سه سطحی وظایف به سه دسته مختلف وظایف با درجه بحرانی کم^۴، متوسط^۵ و زیاد تقسیم می‌شوند که وظایف با درجه بحرانی کم دارای یک بدترین زمان اجرا به نام W^{LO} ، وظایف با درجه بحرانی متوسط دارای دو بدترین زمان اجرای W^{LO} و W^{MI} و وظایف با درجه بحرانی زیاد دارای سه بدترین زمان اجرا می‌باشند که به ترتیب W^{LO} ، W^{MI} و W^{HI} نامیده می‌شوند. سامانه در وضعیت عادی^۶ شروع به کار می‌کند که تمامی وظایف بر اساس W^{LO} اجرا می‌شوند. سپس در صورتی که وظیفه‌ای با درجه بحرانی متوسط یا وظیفه با درجه بحرانی زیاد به اندازه W^{LO} اجرا شود ولی به پایان نرسد، سامانه وارد وضعیت سرریز^۷ می‌شود. در این وضعیت هر دو نوع وظایف با درجه بحرانی متوسط و زیاد بر اساس W^{MI} اجرا می‌شوند. اگر یکی از وظایف با درجه بحرانی زیاد به اندازه W^{MI} اجرا شود ولی به پایان نرسد سامانه وارد وضعیت بحرانی می‌شود. در این وضعیت وظایف با درجه بحرانی زیاد به اندازه W^{HI} اجرا می‌شوند. در برخی از کارهای پیشین انجام شده در این حوزه، هنگامی که سامانه از حالت نرمال خارج می‌شود وظایف با درجه‌ی بحرانی پایین‌تر را از سامانه حذف کرده و اجرا نمی‌کنند [1]. اما در دیگر پژوهش‌ها یک مقدار مشخص به عنوان حداقل کیفیت خدمات برای وظایف با درجه‌ی بحرانی کم در نظر گرفته می‌شود [2].

¹ Mixed-Criticality Systems

² High-Critical Tasks

³ Thermal Design Power (TDP)

⁴ Low-Critical Tasks

⁵ Middle-Critical Tasks

⁶ Normal

⁷ Overrun

و زمان‌بندی شده‌اند. شکل ۱-الف و ۱-ب به ترتیب این دو روش را نشان می‌دهند. همانطور که مشهود است در صورتی که بخواهیم در این دو روش محدودیت توان حرارتی طراحی را رعایت کنیم امکان اجرای وظایف با درجه بحرانی زیاد پیش از موعود زمانی امکان‌پذیر نیست. در حالی که روش پیشنهادی PPA-MiCS که در شکل ۱-ج نمایش داده شده است علاوه بر رعایت محدودیت توان حرارتی طراحی، محدودیت زمانی را نیز رعایت کرده است. در نتیجه مثال انگیزشی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی PPA-MiCS در این مقاله نسبت به روش‌های دیگر برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی وظایف بحرانی-مختلط سه‌سطحی بر روی سامانه‌های چندهسته‌ای با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی و توان بحرانی حرارتی نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد.

۱-۲- نوآوری‌ها

همان‌طور که مثال انگیزشی ذکر شده در بخش قبل نشان می‌دهد، در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی و توان حرارتی طراحی یک امر مهم در زمان‌بندی وظایف بحرانی-مختلط است. همچنین زمان‌بندی وظایف بحرانی-مختلط یک مسئله-ی حل‌نشده در زمان چندجمله‌ای بر حسب اندازه ورودی مسئله است. ما در این مقاله یک روش زمان‌بندی آگاه به اوج توان برای سامانه‌های بحرانی-مختلط سه سطحی چندهسته‌ای ارائه می‌دهیم که با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی و توان حرارتی طراحی وظایف را بر روی هسته‌ها زمان‌بندی می‌کند. همچنین از زمان‌های لختی (بیکاری) باقی‌مانده بر روی هسته‌ها برای بهبود کیفیت خدمات سامانه استفاده می‌کند. نوآوری‌های اصلی ارائه شده در این مقاله شامل موارد زیر است:

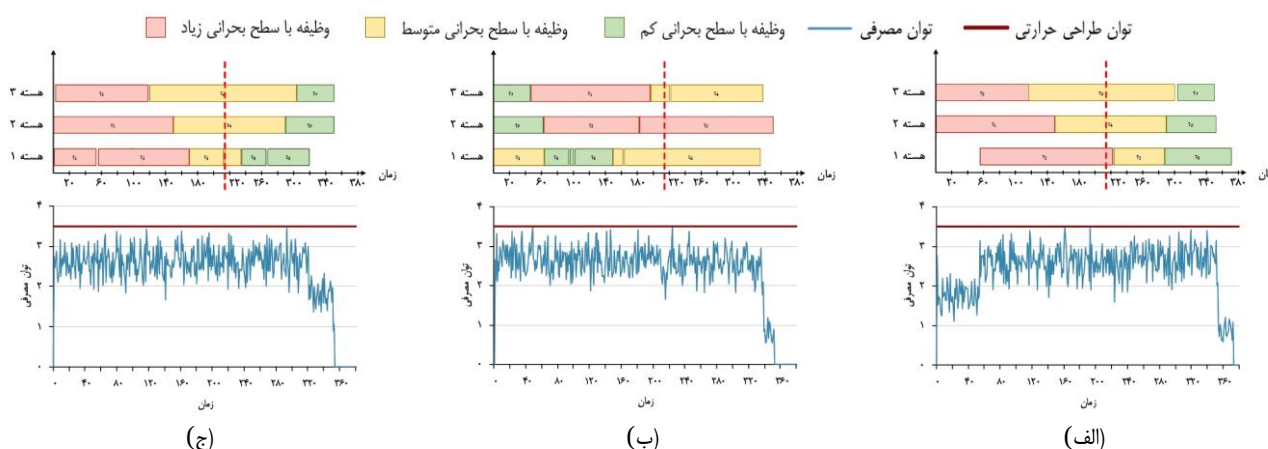
- در نظر گرفتن سامانه‌ی بحرانی-مختلط سه سطحی شامل وظایف با درجه‌ی بحرانی زیاد، متوسط و کم
- ارائه یک روش زمان‌بندی آگاه به اوج توان برای سامانه‌های بحرانی-مختلط سه‌سطحی
- ارائه‌ی روشی جهت بهبود کیفیت خدمات وظایف با درجه‌ی بحرانی کم و متوسط در سامانه با به کارگیری زمان‌های لختی موجود بر روی هسته‌ها

با پیشرفت فناوری و افزایش تعداد هسته‌ها میزان توان مصرفی سامانه‌ها افزایش یافته است. افزایش توان مصرفی سامانه می‌تواند باعث افزایش دمای سامانه شود که این امر می‌تواند باعث آسیب جدی به سامانه شود. توان طراحی طراحی یک محدودیت توانی بر روی سامانه‌های بحرانی-مختلط می‌باشد که در صورتی که توان مصرفی سامانه از این حد مشخص فراتر رود دمای سامانه افزایش پیدا کرده و نهایتاً منجر به خرابی سامانه خواهد شد [3]. روش‌های مدیریت دمای پویا^۱ برای مقابله با این مسئله است که از طریق افزایش سرعت خنک‌کننده‌ها و یا کاهش فرکانس کاری سامانه سعی در کاهش توان مصرفی و دمای آن را دارد. اما این روش‌ها موجب به کاهش چشمگیر عملکرد سامانه می‌شود [4]. همچنین کاهش فرکانس کاری سامانه می‌تواند باعث طولانی‌تر شدن زمان اجرای وظایف شود که با توجه به ماهیت ایمنی-بحرانی بودن سامانه‌های بحرانی-مختلط این مسئله می‌تواند باعث رعایت نکردن موعود زمانی مقرر و در نتیجه بروز فاجعه شود.

در این مقاله، یک روش زمان‌بندی آگاه به اوج توان برای سامانه‌های بحرانی-مختلط سه سطحی مبتنی بر قاب اجرای وظایف با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی و توان طراحی طراحی تحت عنوان PPA-MiCS ارائه شده است. روش پیشنهادی به این صورت است که ابتدا وظایف از بالاترین سطح بحرانی بر اساس بهره‌وری بر روی هسته‌ها نگاشت می‌شوند. سپس وظایف نگاشت شده بر روی هر هسته بر اساس متوسط توان مصرفی مرتب شده و بر اساس درجه بحرانی روی هسته‌ها اجرا می‌شوند. در صورتی که توان مصرفی سامانه از محدودیت توان حرارتی طراحی فراتر رود، اجرای وظیفه را متوقف کرده و از زمانی اجرای وظیفه را ادامه می‌یابد که این محدودیت نقض نشود. در نهایت از زمان‌های لختی^۲ (بیکاری) ایجاد شده بر روی هر هسته برای بهبود کیفیت خدمات استفاده شده است.

۱-۱- مثال انگیزشی

در شکل ۱ زمان‌بندی و توان مصرفی روش پیشنهادی PPA-MiCS و دو روش زمان‌بندی بدون اولویت سطوح بحرانی و روش انتقال وظایف از ابتدا در صورت نقض محدودیت توان حرارتی طراحی نشان داده شده‌اند. برای این منظور ۹ وظیفه با سطوح بحرانی مختلف بر روی سه هسته‌ی پردازشی نگاشت



شکل ۱: مثال انگیزشی: (الف) روش انتقال وظایف از ابتدا، (ب) روش زمان‌بندی بدون اولویت سطوح بحرانی و (ج) روش پیشنهادی PPA-MiCS

¹ Dynamic Thermal Management (DTM)

² Slack Time

جدول ۱: مروری بر کارهای پیشین

منبع	مدل سامانه	مدل معماری	مدیریت اوج توان	مدیریت توان متوسط
[5]	بی‌درنگ سخت	چند هسته‌ای	متناوب	×
[6]			متناوب	×
[4]			مبتنی بر قاب / متناوب	×
[14]			گراف جهت‌دار فاقد دور	✓
[7]	بی‌درنگ نرم	چند هسته‌ای	متناوب	×
[8]			گراف جهت‌دار فاقد دور	✓
[15]			مبتنی بر قاب	✓
[9]			پراکنده	×
[11]	بحرانی-مختلط	چند هسته‌ای	متناوب	×
[10]			گراف جهت‌دار فاقد دور	×
[12]			گراف جهت‌دار فاقد دور	×
[13]			متناوب	✓
روش پیشنهادی	بحرانی-مختلط	چند هسته‌ای	مبتنی بر قاب	×

توان و تداخل داده‌ها در میان وظایف ارائه شده است. از آنجایی که هیچ‌کدام از این پژوهش‌ها وظایف با سطوح بحرانی متفاوت را در نظر نگرفته‌اند، در ادامه برخی از پژوهش‌های این حوزه بررسی می‌شوند.

تمام پژوهش‌های انجام شده در حوزه سامانه‌های بحرانی-مختلط که مدیریت اوج توان را در نظر گرفته‌اند، به دلیل ساده‌تر بودن مدل‌سازی، سامانه‌هایی را با دو سطح بحرانی مورد بررسی قرار داده‌اند [10][11][12] برای حل این مسئله، پژوهش‌هایی انجام شده که وظایف را با بیش از دو سطح بحرانی در نظر گرفته‌اند اما هیچ‌کدام از آن‌ها مدیریت اوج توان در سامانه را در نظر نگرفته‌اند. برای مثال در [13] وظایف به صورت پویا به هسته‌ها تخصیص می‌یابند و تنظیم پویای ولتاژ و فرکانس نیز، برای کاهش مصرف انرژی به کار برده شده است. در این روش متوسط توان مصرفی به صورت یک محدودیت در نظر گرفته شده است اما توجهی به اوج توان در این کار نشده است. جدول ۱ بطور خلاصه کارهای پیشین انجام شده در این حوزه را نشان می‌دهد.

۳- مدل سامانه و فرضیات

در این بخش مدل سامانه و فرضیاتی که در این مقاله استفاده شده است معرفی می‌شوند.

۱-۳- مدل سامانه و وظایف

در این مقاله یک سامانه بحرانی-مختلط چند هسته‌ای متشکل از وظایف با سه سطح بحرانی مختلف در نظر گرفته شده است. وظایف بر روی این سامانه از سطوح مختلف استاندارد DO-178B انتخاب می‌شوند [16]. وظایف بر روی این سامانه مبتنی بر قاب اجرای وظایف هستند بدین معنی که تمامی وظایف سامانه همزمان با هم آزادسازی شده و دارای یک موعود زمانی مشترک D هستند. هر وظیفه بر روی این سامانه با شش پارامتر مختلف W_i^{HI} , W_i^{LO} , L_i , O_i , W_i^{MI} معرفی می‌شود که به ترتیب درجه بحرانی وظیفه، بدترین زمان اجرای کوچک، بدترین زمان اجرای متوسط، بدترین زمان اجرای بزرگ، سطح بحرانی انتخابی از استاندارد DO-178B و وضعیت عملیاتی وظیفه i ام است. همچنین هر وظیفه بر اساس اینکه به کدام یک از سطوح بحرانی

در ادامه این مقاله در بخش ۲ کارهای پیشین این حوزه بررسی شده‌اند. سپس در بخش ۳ مدل سامانه و فرضیات در نظر گرفته شده در این مقاله بیان شده‌اند. در بخش ۴ روش پیشنهادی خود را به تفصیل ارائه داده و سپس در بخش ۵ روش پیشنهادی خود را با کارهای پیشین مقایسه می‌کنیم. در نهایت در بخش آخر از کار انجام شده در این مقاله نتیجه‌گیری به عمل می‌آوریم.

۲- کارهای پیشین

از آنجایی که این پژوهش بر مدیریت اوج توان مصرفی در زمان‌بندی سامانه‌های بحرانی-مختلط تمرکز دارد به همین دلیل، تحقیقات پیشین در این حوزه از دو جنبه‌ی زمان‌بندی‌های ارائه شده برای این سامانه‌ها و روش‌های مدیریت اوج توان مصرفی در سامانه‌های بی‌درنگ مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

مدیریت اوج توان مصرفی باعث افزایش عمر باتری و افزایش قابلیت اطمینان سامانه‌ها می‌شود، از این رو پژوهش‌های [4][5][6][7][8][9] در این زمینه انجام شده‌اند که در برخی از این پژوهش‌ها صرفاً به بحث زمان‌بندی وظایف و مدیریت اوج توان پرداخته شده است، مانند [5]. در تعدادی از این پژوهش‌ها علاوه بر پرداختن به مدیریت اوج توان مصرفی و زمان‌بندی وظایف، بر روی حفظ قابلیت اطمینان نیز تمرکز شده است [4][6][7] در پژوهش انجام شده در [4] روشی برای مدیریت توان حرارتی طراحی در سامانه‌های چند هسته‌ای غیر بحرانی-مختلط معرفی شده است. سپس تحقیقاتی بر روی همین محدودیت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سامانه انجام شد. در پژوهش انجام شده در [5] دو روش زمان‌بندی تحت عنوان زودترین موعد زمانی نخست و زودترین موعد زمانی آخر به ترتیب برای زمان‌بندی وظایف روی هسته اصلی و هسته پشتیبان ارائه شده است. اخیراً در پژوهش انجام شده در [6] روشی برای مدیریت هم‌زمان دو محدودیت توان و قابلیت اطمینان در سامانه‌های چند هسته‌ای ناهمگن ارائه شده است. این روش از محدودیت توان حرارتی طراحی در سطح تراشه و محدودیت توان امن حرارتی در سطح هسته بهره می‌برد تا بتواند این دو متغیر مهم را هم‌زمان در مدیریت کند. در [7] نیز روش تنظیم پویای ولتاژ و فرکانس آگاه به قابلیت اطمینان و اوج توان مصرفی معرفی گردیده که از روش تکرار وظیفه برای تحمل‌پذیری اشکال در سامانه استفاده می‌کند. در پژوهش [8] روش زمان‌بندی برای جلوگیری از وقوع اوج

سامانه تعلق دارد، می‌تواند تا سه مقدار بهره‌وری مختلف داشته باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U^k = \sum_{\tau_i \in \Gamma}^{C_i=k} u_i^k, \quad u_i^k = \frac{w_i^k}{D} \quad (1)$$

۲-۳- مدل توان

توان مصرفی سامانه بر اساس فرمول ۲ محاسبه می‌شود که شامل توان ایستا و پویا است. زمانی که وظیفه‌ای بر روی هسته‌ای در حال اجرا است توان مصرفی شامل توان پویا و ایستا است. اما در زمانی که وظیفه‌ای بر روی هسته در حال اجرا نباشد، توان مصرفی هسته تنها برابر با توان ایستا است.

$$P_{total} = P_{static} + P_{dynamic} = v \cdot I_{leak} + \alpha \cdot C_{eff} \cdot v^2 \cdot f \quad (2)$$

که در فرمول بالا v و f به ترتیب بیانگر فاکتور فعالیت وظیفه، خازن مؤثر، ولتاژ و فرکانس هسته برای اجرای وظیفه و میزان جریان نشستی است.

۴- روش پیشنهادی

شکل ۲ روند کاری روش پیشنهادی PPA-MiCs را نمایش می‌دهد. ما یک سامانه بحرانی-مختلط سه سطحی با m هسته را در نظر گرفته‌ایم که n وظیفه مبتنی بر قاب اجرای وظایف بر روی آن اجرا می‌شود. هدف این روش پیشنهادی اجرای وظایف بر روی هسته‌ها به شکلی است که محدودیت‌های زمانی و توان حرارتی طراحی نقض نشود.

الگوریتم ۱، روش پیشنهادی PPA-MiCs را نشان می‌دهد. در گام نخست وظایف براساس درجه بحرانی آن‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند و سپس بر اساس بهره‌وری، وظایف هر دسته مرتب می‌شوند (خط ۱). سپس از سیاست بدترین انطباق کاهشی برای نگاشت وظایف استفاده می‌شود. وظایف به ترتیب اولویت

الگوریتم ۱: روند نگاشت و زمانبندی وظایف

Inputs: $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, $\Gamma = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$, TDP
Outputs: Mapping & Scheduling
1. $\Gamma' \leftarrow$ sort Γ based on criticality & utilization
2. for $(\tau_i \in \Gamma')$ do
3. Map τ_i on a prrcessor based on the worst-fit policy
4. end for
5. if (Eq. 5 is not satisfied) do
6. return NotFeasible
7. end if
8. for $(P_i \in P)$ do
9. $\Gamma'_i \leftarrow$ Sort Γ based on criticality & average power
10. Schedule tasks in Γ'_i
11. end for
12. while (TDP is not satisfied at time t) do
13. $\tau_i \leftarrow$ select a task with lower start time which executed in time t
14. Suspend τ_i in time t & shift the remaning part of it
15. end while

براساس سطح بحرانی بر روی هسته‌ها نگاشت می‌شوند (خط ۲-۴). سپس وظایف نگاشت شده بر روی هر هسته ابتدا براساس درجه بحرانی هر یک دسته‌بندی می‌شوند و سپس هر دسته بر اساس توان مصرفی متوسط مرتب شده (خط ۹) و به ترتیب اجرا می‌شوند. اولویت اجرا با وظایفی است که در دسته با درجه بحرانی زیاد هستند (خط ۱۰). در صورتی که توان سامانه از توان حرارتی طراحی بالاتر برود اجرای وظیفه قطع می‌شود و باقی‌مانده‌ی زمان اجرای وظیفه از زمانی پیش برده می‌شود که اجرای وظیفه موجب نقض محدودیت توان حرارتی نشود (خط ۱۳-۱۴). این فرایند بر روی تمام وظایف از گروه‌های مختلف با درجه بحرانی‌های مختلف اعمال می‌شود تا زمانی که تمامی وظایف بر روی هسته‌ها نگاشت و زمانبندی شوند.

نگاشت وظایف بر روی هسته به‌صورت یک ماتریس M_{ij} نمایش داده می‌شود که i نشان‌دهنده وظیفه و j نشان‌دهنده هسته‌ی سامانه است. در صورتی که وظیفه i ام بر روی هسته j ام نگاشت شود مقداری برابر یک می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار آن برابر صفر خواهد بود. همچنین توان مصرفی سامانه نیز به‌صورت یک ماتریس P_{it} نمایش داده می‌شود که بیانگر توان مصرفی وظیفه i ام در زمان t است. محدودیت زمانی در نظر گرفته شده برای سامانه را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد:

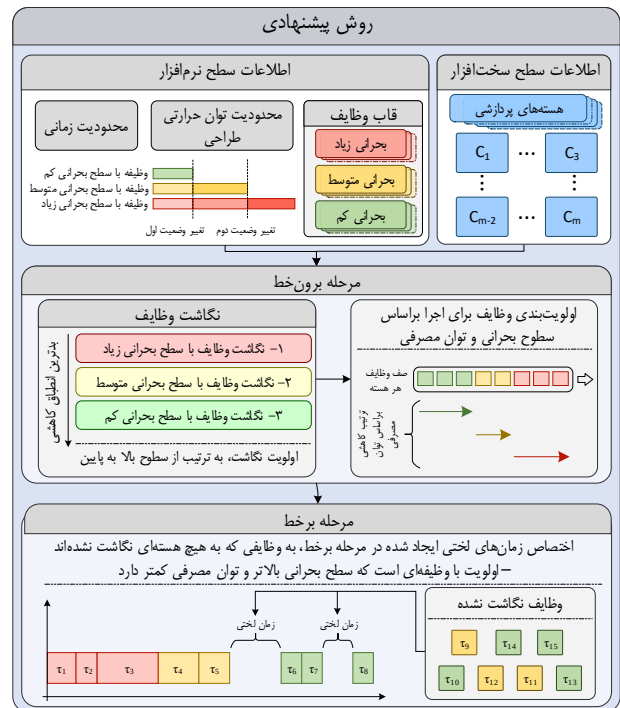
$$\forall j: \sum_i M_{ij} \cdot w_{ceti} < Deadline \quad (3)$$

همچنین محدودیت توان حرارتی طراحی نیز برای سامانه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\forall t: \sum_{ij} P_{it} \cdot M_{ij} < TDP \quad (4)$$

۱-۴- نگاشت وظایف

برای نگاشت وظایف بر روی هسته‌ها ابتدا وظایف بر اساس سطوح بحرانی دسته‌بندی و سپس هر دسته بر اساس بهره‌وری به‌صورت نزولی مرتب می‌شود. پس از مرتب‌کردن وظایف، ابتدا وظایف با درجه بحرانی زیاد بر روی هسته‌ها نگاشت می‌شوند. برای نگاشت وظایف از سیاست بدترین انطباق کاهشی استفاده شده است. پس از نگاشت تمامی وظایف با درجه بحرانی زیاد بر روی هسته‌ها، به ترتیب وظایف با درجه بحرانی متوسط و وظایف با درجه

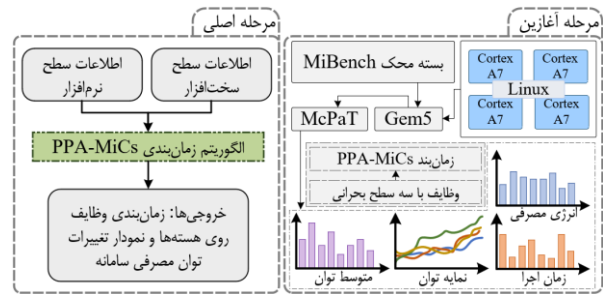


شکل ۲: نمای کلی روش پیشنهادی

وظیفه را متوقف کرده و از نقطه‌ای که اجرای مجدد آن باعث نقض توان حرارتی طراحی نشود، اجرای آن از سر گرفته می‌شود. در صورتی که تمامی وظایف با درجه بحرانی زیاد به درستی پیش از موعود زمانی زمان‌بندی شوند و محدودیت توان حرارتی طراحی نقض نشود، اجرای وظایف بر روی سامانه امکان‌پذیر است.

۵- ارزیابی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی را بیان می‌کنیم. برای این منظور از پردازنده ARM Cortex-A7 برای شبیه‌سازی استفاده نموده‌ایم. همچنین از دسته محک MiBench برای انتخاب وظایف واقعی برای شبیه‌سازی استفاده نموده‌ایم. شکل ۳ طرح کلی از ابزارهای مورد استفاده در پیاده‌سازی روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد. برای مقایسه، روش پیشنهادی خود را با روش انتقال وظایف از ابتدا (در صورت نقض توان حرارتی طراحی) و زمان‌بندی بدون در نظر گرفتن اولویت وظایف مقایسه نموده‌ایم. در روش انتقال وظایف از ابتدا در صورتی که محدودیت توان حرارتی طراحی نقض شود وظیفه از ابتدا به جلو منتقل می‌شود تا جایی که محدودیت توان حرارتی طراحی نقض نشود. روش پیشنهادی PPA-MiCs از سه جنبه‌ی مختلف با این دو روش مقایسه شده است که عبارتند از امکان‌پذیری اجرا (که شامل زمان‌بندی‌پذیری و رعایت محدودیت توان حرارتی طراحی است)، کیفیت خدمات و نرخ نقض موعود زمانی. امکان اجرای وظایف به معنی اجرای وظایف پیش از موعود زمانی و رعایت محدودیت توان حرارتی طراحی است. کیفیت خدمات و نرخ نقض موعود زمانی به ترتیب به صورت میزان اجرای وظایف با درجه بحرانی متوسط پیش از موعود زمانی و نرخ نقض موعود زمانی برای وظایف با



شکل ۳: ابزارهای استفاده شده در ارزیابی روش پیشنهادی

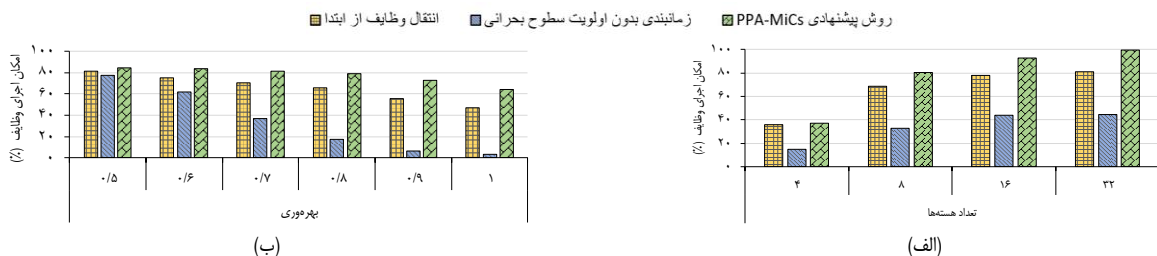
بحرانی کم نیز به همین ترتیب بر روی هسته‌ها نگاشت می‌شوند. باید توجه داشت که هنگام نگاشت وظایف با درجه بحرانی زیاد شرط زیر برقرار باشد:

$$\forall j : \sum_{i \in HI} M_{ij} \cdot U(HI, HI)_i < 1 \quad (5)$$

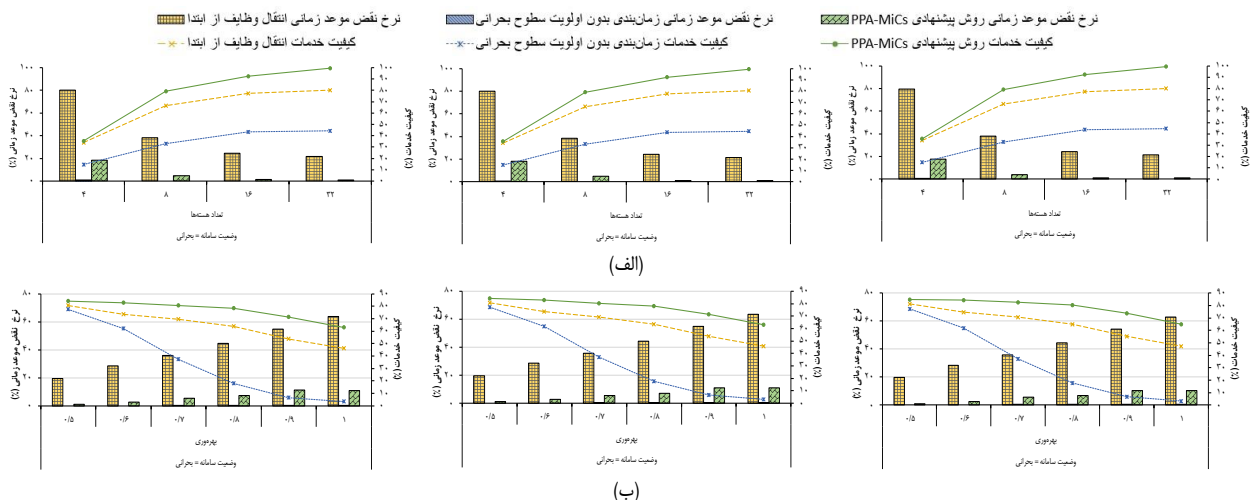
در صورت برقرار بودن نامعادله بالا می‌توان نتیجه گرفت که سامانه در بدترین حالت می‌تواند تمامی وظایف با درجه‌ی بحرانی زیاد را بر روی هسته‌ها پیش از موعود زمانی اجرا کند. باید توجه داشت که شرط بالا تنها محدودیت زمانی را در نظر گرفته است در حالی که در این مقاله ما علاوه بر محدودیت زمانی، محدودیت توان حرارتی طراحی را نیز لحاظ کرده‌ایم.

۲-۴- زمان‌بندی وظایف

پس از نگاشت وظایف بر روی هسته‌ها، وظایف نگاشت شده بر روی هر هسته به ترتیب اولویت از لحاظ سطوح بحرانی و سپس وظایف هر دسته بر اساس توان مصرفی متوسط بصورت نزولی مرتب می‌شوند. پس از مرتب نمودن وظایف در صف اجرای هسته‌ها وظایف باید اجرا شوند. در صورتی که در هر لحظه از زمان، توان مصرفی سامانه از توان حرارتی طراحی بالاتر رود اجرای



شکل ۴: نتایج ارزیابی امکان اجرای وظایف روش پیشنهادی PPA-MiCs با روش‌های زمان‌بندی بدون اولویت سطوح بحرانی و انتقال وظایف از ابتدا



شکل ۵: نتایج ارزیابی کیفیت خدمات و نرخ نقض موعود زمانی روش پیشنهادی PPA-MiCs با روش‌های زمان‌بندی بدون اولویت سطوح بحرانی و انتقال وظایف از ابتدا

Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Grenoble, France, 2013, pp. 147-152.

- [3] Intel Corporation. 2007. Dual-core intel xeon processor 5100 series datasheet, revision 003.
- [4] W. Munawar, H. Khdr, S. Pagani, M. Shafique, J. -J. Chen and J. Henkel, "Peak Power Management for scheduling real-time tasks on heterogeneous many-core systems," *2014 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, Hsinchu, Taiwan, 2014, pp. 200-209.
- [5] M. Ansari, A. Yeganeh-Khaksar, S. Safari and A. Ejlali, "Peak-Power-Aware Energy Management for Periodic Real-Time Applications," in *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 779-788, April 2020.
- [6] M. Ansari, M. Pasandideh, J. Saber-Latibari and A. Ejlali, "Meeting Thermal Safe Power in Fault-Tolerant Heterogeneous Embedded Systems," in *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 29-32, March 2020.
- [7] A. Yeganeh-Khaksar, M. Ansari and A. Ejlali, "ReMap: Reliability Management of Peak-Power-Aware Real-Time Embedded Systems Through Task Replication," in *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 10, no. 1, pp. 312-323, 1 Jan.-March 2022.
- [8] B. Lee, J. Kim, Y. Jeung and J. Chong, "Peak power reduction methodology for multi-core systems," *2010 International SoC Design Conference*, Incheon, Korea (South), 2010, pp. 233-235.
- [9] Z. Lee, B. Yun and K. G. Shin, "Reducing Peak Power Consumption in Multi-Core Systems without Violating Real-Time Constraints," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1024-1033, 2014.
- [10] S. Safari, H. Khdr, P. Gohari-Nazari, M. Ansari, S. Hessabi and J. Henkel, "TherMa-MiCs: Thermal-Aware Scheduling for Fault-Tolerant Mixed-Criticality Systems," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 33, no. 7, pp. 1678-1694, 1 July 2022.
- [11] M. Navardi, B. Ranjbar, N. Rohbani, A. Ejlali and A. Kumar, "Peak-Power Aware Life-Time Reliability Improvement in Fault-Tolerant Mixed-Criticality Systems," in *IEEE Open Journal of Circuits and Systems*, vol. 3, pp. 199-215, 2022.
- [12] B. Ranjbar, A. Hosseinghorban, M. Salehi, A. Ejlali and A. Kumar, "Toward the Design of Fault-Tolerance-Aware and Peak-Power-Aware Multicore Mixed-Criticality Systems," in *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 41, no. 5, pp. 1509-1522, May 2022.
- [13] H. Sobhani, S. Safari, J. Saber-Latibari, and S. Hessabi, "REALISM: Reliability-aware energy management in multi-level mixed-criticality systems with service level degradation," *Journal of Systems Architecture*, vol. 117, p. 102090, Aug. 2021.
- [14] Z. Li, S. Ren, and G. Quan, "Energy minimization for reliability-guaranteed real-time applications using DVFS and checkpointing techniques," *Journal of Systems Architecture*, vol. 61, no. 2, pp. 71-81, Feb. 2015.
- [15] M. Ansari, M. Salehi, S. Safari, A. Ejlali and M. Shafique, "Peak-Power-Aware Primary-Backup Technique for Efficient Fault-Tolerance in Multicore Embedded Systems," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 142843-142857, 2020.
- [16] DO-178C. 2011. Software considerations in airborne systems and equipment certification. RTCA, Inc.

میزان بهره‌وری به ازای هر پردازنده را ۰.۵ تا ۱ (با گام ۰.۱) در نظر گرفته‌ایم. برای هر وظیفه سطح بحرانی آن را به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت از بین سه سطح بحرانی موجود انتخاب کرده‌ایم و وظایف را بر روی ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ هسته پردازشی همگن اجرا کرده‌ایم. همچنین سیستم را در سه وضعیت مورد بررسی قرار داده‌ایم: (۱) حالت عادی سامانه که همه هسته‌ها در وضعیت عادی هستند، (۲) سرریز که همه هسته‌ها در وضعیت سرریز هستند و (۳) بحرانی که در آن تمامی هسته‌ها در وضعیت بحرانی می‌باشند. همانطور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، امکان اجرای وظایف با افزایش بهره‌وری کاهش می‌یابد. با این حال، روش پیشنهادی PPA-MiCs به دلیل انتقال بخشی از وظیفه به جای انتقال کل آن و استفاده بهتر از منابع پردازشی، نسبت به روش انتقال وظایف از ابتدا ۱۱.۵٪ بهبود دارد. همچنین روش پیشنهادی PPA-MiCs به دلیل در نظر گرفتن سطوح بحرانی مختلف نسبت به روش زمان‌بندی بدون اولویت سطوح بحرانی ۴۳.۲۸٪ بهبود دارد. روند بهبود امکان اجرای وظایف با افزایش تعداد هسته‌ها به دلیل وجود منابع پردازشی بیشتر در شکل ۴-ب مشاهده است.

در شکل ۵-الف و شکل ۵-ب، کیفیت خدمات و نرخ نقض موعود زمانی بررسی شده است. روش پیشنهادی به دلیل انتقال بخشی از وظیفه که باعث استفاده بهتر از منابع پردازشی می‌شود از نظر کیفیت خدمات نسبت به روش انتقال وظایف از ابتدا و روش زمان‌بندی بدون اولویت سطوح بحرانی به ترتیب، ۱۲.۳۳٪ و ۴۳.۲۳٪ بهبود یافته است. همچنین نرخ نقض موعود زمانی نسبت به روش انتقال وظایف از ابتدا ۳۴.۷۸٪ بهبود داشته است. با افزایش تعداد هسته‌ها به دلیل وجود منابع پردازشی بیشتر نرخ نقض موعود زمانی و کیفیت خدمات نیز بهبود می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری و کارهای آتی

در این مقاله، یک روش زمان‌بندی آگاه به اوج توان برای سامانه بحرانی-مختلط سه‌سطحی مبتنی بر قاب اجرای وظایف بر روی بستر چندهسته‌ای با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی و توان حرارتی طراحی ارائه شده است. در روش پیشنهادی وظایف بر اساس سطوح بحرانی بر روی هسته‌ها نگاشت می‌شوند. سپس بر اساس سطوح بحرانی و میانگین توان مصرفی، وظایف نگاشت شده بر روی هر هسته مرتب و سپس زمان‌بندی می‌شوند. در هر زمان که توان سامانه از توان حرارتی طراحی فراتر رود اجرای وظایف متوقف می‌شود و مجدداً از لحظه‌ای که محدودیت توان حرارتی طراحی قطعاً رعایت خواهد شد اجرای باقی‌مانده‌ی زمان اجرای وظیفه انجام خواهد شد. نتایج مقایسه‌ی روش پیشنهادی PPA-MiCs نشان می‌دهد از جنبه‌ی زمان‌بندی‌پذیری ۲۷٪ و از جنبه‌ی کیفیت خدمات ۲۸٪ نسبت به روش‌های دیگر بهبود داده شده است. در آینده روش ارائه شده در این مقاله بر روی سامانه‌های بحرانی-مختلط سه‌سطحی چندهسته‌ای ناهمگن توسعه می‌یابد. به این صورت که نگاشت وظایف بر روی هسته‌ها به صورتی انجام می‌پذیرد که توان مصرفی سامانه محدودیت توان حرارتی طراحی را نقض نکند.

مراجع

- [1] A. Burns, and R. I. Davis, "A survey of research into mixed-criticality systems," *Journal ACM Computing Surveys*, volume 50, p-p1-37, 2018.
- [2] H. Su and D. Zhu, "An Elastic Mixed-Criticality task model and its scheduling algorithm," *2013 Design, Automation &*