

الگوریتم کاهش انرژی مصرفی پویا برای سیستم‌های بی‌درنگ بحرانی- مختلط با پردازنده‌های چند هسته‌ای

سید حسن صادق‌زاده

بحرانی- مختلط (به‌ویژه صنعت خودروسازی [۱] و [۲] و هوافضا [۱۶] و [۱۷])، طراحی و پیاده‌سازی این سیستم‌ها را گسترش داده و استفاده از آنها در سال‌های اخیر به‌صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است. سیستم‌های سایبر- فیزیکی (CPS)^۵ و اینترنت اشیا (IoT)^۶ مفاهیمی هستند که مبتنی بر سیستم‌های بحرانی- مختلط معرفی گردیده‌اند [۱۸]. این سیستم‌ها دارای وظایفی با درجه اهمیت متفاوت هستند و از این رو وظایف با توجه به درجه اهمیت تقسیم می‌شوند. اگر وظایف مهم‌تر باشند، آنها به‌عنوان وظایف با اهمیت بالا (وظایف ایمنی- بحرانی) و اگر وظایف کم‌اهمیت‌تر باشند، به‌عنوان وظایف با اهمیت پایین (وظایف ایمنی- غیربحرانی) طبقه‌بندی می‌شوند [۵] و [۱۹]. در سیستم‌های بحرانی- مختلط، وظایف ایمنی- بحرانی علاوه بر طراح سیستم^۷، توسط صادرکننده گواهی^۸ ارزیابی و اعتبارسنجی^۹ می‌شوند. این در حالی است که وظایف ایمنی- غیربحرانی تنها توسط طراح سیستم مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار می‌گیرند. صادرکننده گواهی، شرایط محافظه‌کارانه‌تری^{۱۰} را برای ارزیابی بدترین زمان اجرای وظایف^{۱۱} (WCET) مد نظر قرار می‌دهد (از جمله در نظر گرفتن زمان اجرای فرایند ارزیابی از خطا) و از روش‌های متفاوتی نسبت به طراح استفاده می‌کند [۱۰]. بنابراین در اغلب موارد بدترین زمان اجرای وظایف ایمنی- بحرانی توسط صادرکننده گواهی از زمان اجرای محاسبه‌شده توسط طراح بیشتر می‌باشد.

به‌عنوان نمونه‌ای بارز از سیستم‌های بحرانی- مختلط می‌توان به وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین^{۱۲} (UAV) اشاره کرد که در این وسایل، وظایف به دو گروه ایمنی- بحرانی (شامل کنترل پرواز و مسیریابی) و ایمنی- غیربحرانی (شامل ردیابی شیء برای نظارت و گرفتن عکس) تقسیم می‌شوند [۱۱]. این سیستم‌ها بی‌درنگ^{۱۳} هستند و باید مهلت زمانی^{۱۴} خود را در هر شرایط محیطی رعایت کنند. بنابراین عدم انجام وظایف ایمنی- بحرانی می‌تواند عواقب فاجعه‌باری داشته باشد؛ در حالی که عدم انجام وظایف ایمنی- غیربحرانی فقط می‌تواند منجر به کاهش خدمات به کاربر شوند و قابل تحمل هستند [۱۰]. بنابراین هدف اصلی این سیستم‌ها، اجرای به‌موقع وظایف ایمنی- بحرانی است که در بعضی از

چکیده: امروزه برخلاف سیستم‌های تعبیه‌شده سنتی که دارای وظایف با درجه اهمیت یکسان هستند، بسیاری از سیستم‌های تعبیه‌شده، بحرانی- مختلط می‌باشند و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های بحرانی- مختلط، سیستم‌های تعبیه‌شده بی‌درنگی هستند که برای تجمیع برنامه‌های ایمنی- بحرانی و ایمنی- غیربحرانی بر روی یک بستر مشترک سخت‌افزاری معرفی شده‌اند. پردازنده‌های چند هسته‌ای، قابلیت تجمیع کاربردهای متفاوت بر روی یک سخت‌افزار را فراهم کرده و می‌توانند انتخاب مناسبی برای سیستم‌های تعبیه‌شده بحرانی- مختلط باشند. با این حال، کاهش انرژی مصرفی در این سیستم‌ها به دلیل حجم بالای پردازش و طراحی عموماً مبتنی بر باتری آنها یک نیاز ضروری است؛ بنابراین در این مقاله، یک روش زمان‌بندی ابتکاری به‌منظور کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های بحرانی- مختلط متشکل از پردازنده چند هسته‌ای معرفی می‌شود. این الگوریتم ضمن تضمین اجرای به‌موقع وظایف بحرانی، انرژی مصرفی سیستم را با تغییر پویای ولتاژ و فرکانس (DVFS) کاهش خواهد داد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که انرژی مصرفی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مشابه تا ۳۰٪ بهبود می‌یابد.

کلیدواژه: سیستم‌های تعبیه‌شده بحرانی- مختلط، پردازنده‌های چند هسته‌ای، انرژی مصرفی، تغییر پویای ولتاژ و فرکانس.

۱- مقدمه

بسیاری از سیستم‌های نهفته^۱ در کاربردهای ایمنی- بحرانی^۲ به کار گرفته می‌شوند که در ارتباط مستقیم با حیات انسان‌ها، محیط‌زیست و یا اقتصاد و امنیت کشورها هستند. از جمله این کاربردها می‌توان به صنایع پزشکی، هوایی و فضایی، ارتباطی و نظامی اشاره کرد [۱] تا [۴]. نیازهایی همچون کاهش هزینه تولید، وزن و اندازه، منجر به طراحی سیستم‌هایی با قابلیت‌های^۳ متفاوت بر روی یک بستر مشترک سخت‌افزاری شده است. این سیستم‌ها به دلیل یکپارچه‌سازی قابلیت‌های ایمنی- بحرانی با قابلیت‌های ایمنی- غیربحرانی، سیستم‌های بحرانی- مختلط^۴ نامیده می‌شوند [۵] تا [۱۱]. بنابراین سیستم‌های بحرانی- مختلط، گسترش‌یافته سیستم‌های ایمنی- بحرانی بوده و نسل بعدی سیستم‌های نهفته در نظر گرفته می‌شوند [۱۲] تا [۱۵]. نیاز و تمایل صنعت به سیستم‌های نهفته

این مقاله در تاریخ ۴ تیر ماه ۱۴۰۱ دریافت و در تاریخ ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

سید حسن صادق‌زاده (نویسنده مسئول)، گروه کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، (email: Sadeghzadeh@pnu.ac.ir).

1. Embedded Systems
2. Safety-Critical
3. Functionalities
4. Mixed-Criticality Systems

5. Cyber-Physical Systems

6. Internet of Things

7. System Designer

8. Certificate Authority

9. Validate

10. Conservative

11. Worst Case Execution Time

12. Unmanned Aerial Vehicle

13. Real-Time

14. Deadline

وظایف بحرانی، انرژی مصرفی یک سیستم چنددهسته‌ای را در مقایسه با روش‌های مشابه به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. در این مقاله، منظور از وظایف بحرانی، وظایف ایمنی- بحرانی و منظور از وظایف غیربحرانی، وظایف ایمنی- غیربحرانی می‌باشد.

بخش‌بندی مقاله به این ترتیب است که بخش ۲ مروری کلی از کارهای مرتبط را فراهم می‌کند و در بخش ۳، مدل سیستم بیان می‌شود. بخش ۴ ضمن بیان راهکار پیشنهادی، زیرمسائل لازم برای حل مسئله اصلی را معرفی می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی در بخش ۵ نشان داده شده و در بخش ۶ نتیجه‌گیری نهایی تشریح خواهد شد.

۲- مروری بر کارهای مرتبط

مطالعات زیادی در زمینه کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های بی‌درنگ انجام شده است (برای اطلاعات بیشتر به مقالات مروری [۲۷] و [۲۸] مراجعه شود). در این مطالعات، درجه اهمیت وظایف یکسان در نظر گرفته شده‌اند؛ اما همان‌طور که قبلاً اشاره شد در سیستم‌های نهفته بی‌درنگ بحرانی- مختلط، برنامه‌های مختلف بر روی یک تراشه در کنار هم و با درجه بحرانی متفاوت قرار می‌گیرند. وجود وظایف با درجه بحرانی متفاوت باعث می‌شود که مطالعات ذکرشده برای سیستم‌های بحرانی- مختلط کارا نبوده و مباحث مطرح، به‌ویژه بی‌درنگی و مدیریت انرژی مصرفی نیاز به دقت نظر بیشتری دارد. مفهوم بحرانییت مختلط اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط وستال^۸ معرفی گردید [۱۶]. در این مقاله نشان داده شده که به‌دلیل وجود وظایف با بحرانییت‌های متفاوت، روش‌های رایج زمان‌بندی در سیستم‌های نهفته بی‌درنگ (مانند RM^۸ و DM^{۱۰}) بهینه نیست و به همین علت در [۹] الگوریتم OCBP، در [۸] الگوریتم CBEDF و در [۷] الگوریتم EDF-VD برای زمان‌بندی سیستم‌های بحرانی- مختلط معرفی گردیده‌اند.

بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهند که اخیراً برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های نهفته بی‌درنگ بحرانی- مختلط نیز مطالعاتی انجام شده است (برای اطلاعات بیشتر به مقالات مروری [۲۹] مراجعه شود). در اکثر این مطالعات، راه حلی برای کاهش دادن انرژی مصرفی در سیستم تک‌پردازنده‌ای ارائه گردیده است. در [۳۰] نویسندگان در یک سیستم چنددهسته‌ای، راه حلی برای کاهش انرژی مصرفی معرفی کرده‌اند. در این مقاله بعد از نگاشت وظایف، طبق الگوریتم ارائه‌شده در [۳۱] فرکانس کاری هر وظیفه به‌صورت ایستا مشخص شده و وظایف بر اساس این فرکانس اجرا می‌شوند؛ اما به‌دلیل ایستابودن این الگوریتم نمی‌توان از زمان‌های بیکاری ایجادشده در حین اجرای وظایف برای کاهش بیشتر فرکانس کاری وظایف استفاده نمود. در آخرین کار ما [۱] از زمان‌های بیکاری ایجادشده به‌صورت پویا برای کاهش بیشتر فرکانس استفاده می‌شود؛ اما این راه حل در سیستم تک‌پردازنده‌ای ارائه شده است. همچنین در بیشتر این مطالعات فقط توان مصرفی دینامیک در نظر گرفته شده و از توان مصرفی ایستا که مربوط به جریان‌های نشتی می‌باشد [۳۲] صرف نظر شده است. این در حالی است که در مدارات دیجیتال امروزی و با کاهش ابعاد، توان مصرفی ایستا و دینامیک از اهمیت یکسانی برخوردار هستند. بنابراین در این پژوهش هر دو توان مصرفی ایستا و دینامیک در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، وضعیت سیستم و میزان انرژی

موقع (در بخش ۳ به‌طور کامل به این موضوع خواهیم پرداخت) وظایف ایمنی- غیربحرانی برای تضمین رفتار به‌موقع وظایف ایمنی- بحرانی، قربانی می‌شوند.

پردازنده‌های چنددهسته‌ای به‌دلیل افزایش کارایی و قدرت محاسباتی بالا به‌طور گسترده در سیستم‌های نهفته مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۰] و [۲۱]. همچنین این پردازنده‌ها قابلیت تجمیع کاربردهای متفاوت بر روی یک سخت‌افزار را فراهم کرده و می‌توانند انتخاب مناسبی برای سیستم‌های نهفته با بحرانییت مختلط باشند [۲۲]. با این حال، میزان انرژی مصرفی^۱ به‌دلیل سیار و قابل حمل بودن^۲ این سیستم‌ها بسیار حائز اهمیت بوده و وابسته به طول عمر باتری آنهاست [۱۲]. علاوه بر آن در بسیاری از کاربردها تعویض یا شارژ باتری در محیط عملیاتی سیستم‌های نهفته بسیار دشوار است [۲۳]. از این گذشته برای سیستم‌هایی که مشکل تأمین انرژی ندارند، افزایش توان و انرژی مصرفی باعث تولید گرما شده و گرمای تولیدشده مخصوصاً در واحدهای پردازشی موجب تأخیر در مدارها و خرابی و کاهش قابلیت اطمینان^۳ قطعات سیستم می‌شود [۱]، [۲] و [۱۴]. این امر باعث شده که در کنار انجام به‌موقع وظایف، مصرف انرژی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ملاحظات در طراحی سیستم‌های نهفته‌ای مطرح شود که از منابع محدود انرژی استفاده می‌کنند [۱۲] و [۱۹].

از مهم‌ترین روش‌های سطح سیستم برای مدیریت انرژی، مدیریت پویای توان^۴ (DPM) [۲۴] و تغییر پویای ولتاژ تغذیه و فرکانس^۵ (DVFS) [۲۵] است. این روش‌ها از زمان بیکاری موجود در سیستم برای کاهش مصرف انرژی استفاده می‌کنند. روش DPM در مواقعی که بخشی از سیستم به‌صورت موقت نیاز نباشد، آن بخش را به حالت غیر فعال برده و یا خاموش می‌کند. روش DVFS، هنگامی که زمان بیشتری نسبت به زمان مورد نیاز برای انجام کار فعلی در اختیار باشد، ولتاژ تغذیه (و فرکانس کاری) واحد مورد نظر را کاهش می‌دهد تا مصرف انرژی و توان پویای^۶ سیستم را کاهش دهد؛ اما ثابت می‌شود این روش‌ها روش‌ها به‌دلیل افزایش زمان اجرای وظیفه می‌توانند در سیستم‌های بی‌درنگ منجر به نقض مهلت‌های زمانی و سبب بروز فاجعه شوند [۲۶]. بنابراین بین روش‌هایی که برای کاهش مصرف انرژی و فراهم کردن بی‌درنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تضاد قابل توجهی وجود دارد [۱۵]. از این رو، یکی از الزامات اساسی این سیستم‌ها دستیابی به زمان‌بندی مناسب همراه با انرژی مصرفی کم می‌باشد.

در این مقاله سعی گردیده تا با کمک پردازنده‌های چنددهسته‌ای، الگوریتمی برای بهبود انرژی مصرفی با استفاده از زمان‌های بیکاری ایجادشده در حین اجرای وظایف ارائه گردد. هدف، کاهش مصرف انرژی و تضمین اجرای به‌موقع وظایف بحرانی در یک سیستم چنددهسته‌ای است. این الگوریتم از روش زمان‌بندی برخط^۷ معرفی‌شده در آخرین پژوهش ما (ارائه‌شده در یک سیستم تک‌پردازنده‌ای [۱])، الهام گرفته و از این رو نتایج با نگاشت مناسب وظایف در سیستم‌های چنددهسته‌ای گسترش می‌یابد. بنابراین این الگوریتم، ضمن تضمین اجرای به‌موقع

1. Energy Consumption
2. Portable
3. Reliability
4. Dynamic Power Management
5. Dynamic Voltage and Frequency Scaling
6. Dynamic Power
7. Online

8. Vestal

9. Rate Monotonic

10. Deadline Monotonic

جدول ۱: خلاصه‌ای از راهکارهای ارائه شده برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های بحرانی - مختلط.

منبع	درجه بحرانی وظایف	راهکار ارائه شده برای کاهش انرژی مصرفی	مغایب
[۲]، [۱۹]، [۲۶] و [۳۲]	یکسان	ارائه شده در این مطالعات برای سیستم‌های بحرانی - مختلط کارا نیست.	وجود وظایف با درجه اهمیت یکسان
[۱]	متفاوت	زمان بندی دینامیک و استفاده از DVFS	تک پردازنده‌ای
[۱۹]	متفاوت	زمان بندی ایستا و استفاده از DVFS	تک پردازنده‌ای
[۳۰]	متفاوت	زمان بندی ایستا و استفاده از DVFS (چند هسته‌ای)	عدم استفاده از زمان‌های بیکاری ایجاد شده در حین اجرای وظایف
[۳۱]	متفاوت	زمان بندی ایستا و استفاده از DVFS	تک پردازنده‌ای
[۳۳]	متفاوت	حذف وظایف غیر بحرانی، (چند هسته‌ای)	در این مقاله مشخص شده که مصالح‌های بین حذف وظایف غیر بحرانی و کاهش مصرف انرژی وجود دارد (عدم استفاده از زمان‌های بیکاری).
[۳۴]	متفاوت	حذف وظایف غیر بحرانی برای کاهش انرژی مصرفی و استفاده از DPM	تک پردازنده‌ای

غیر بحرانی حذف خواهند شد [۴] تا [۶]؛ بنابراین در حالت عادی وظایف غیر بحرانی به طور کامل اجرا شده و از زمان رزرو وظایف بحرانی برای کاهش انرژی مصرفی استفاده خواهد شد.

مصرفی در هر دو حالت بحرانی و غیر بحرانی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. خلاصه‌ای از مطالبی که در این بخش گفته شد و چند کار دیگر در جدول ۱ آمده است.

۳-۲ مدل انرژی مصرفی

انرژی مصرفی یک سیستم، توان مصرفی آن سیستم را در زمان سپری شده برای اجرای کار نشان می‌دهد. توان مصرفی در حالت فعال به دو بخش توان مصرفی ایستا^۴ (P_s) و توان مصرفی پویا^۵ (P_d) تقسیم می‌شود. توان ایستا مربوط به جریان نشتی در سیستم است و تنها با قطع ولتاژ تغذیه و خاموش کردن کل سیستم حذف می‌شود [۱] و [۳۲]. توان پویا شامل توان پویای وابسته به فرکانس^۶ (P_{dep}) و توان پویای مستقل از فرکانس^۷ (P_{ind}) می‌شود [۳۲]؛ در نتیجه میزان توان مصرفی مشابه آنچه در [۱] و [۳۲] آمده است به صورت (۱) خواهد بود

$$P_{Active} = P_s + P_d = P_s + P_{ind} + P_{dep} = P_s + P_{ind} + C_{ef} V_{dd}^2 f \quad (1)$$

که در آن f فرکانس عملیاتی (پردازشی)، C_{ef} ظرفیت متوسط خازن سوئیچ زنی و ولتاژ تغذیه است. از آنجا که برای کاهش انرژی مصرفی علاوه بر فرکانس، ولتاژ تغذیه نیز باید تنظیم شود، در ادامه و برای سادگی از کلمه «فرکانس» به عنوان نماینده «فرکانس و ولتاژ» استفاده می‌شود. از این رو رابطه بالا با پارامتر z (که نشان دهنده رابطه خطی فرکانس و ولتاژ است [۱] و [۳۲]) به صورت (۲) باز نویسی می‌شود

$$P_{Active} = P_s + P_{ind} + C_{ef} z^a \quad (2)$$

که ضریب a ($2 \leq a \leq 3$) از ضرایب ثابت وابسته به سیستم است؛ به عبارت دیگر a رابطه تقریباً خطی ولتاژ و فرکانس را مدل می‌کند. با توجه به اینکه انرژی، انتگرال توان در زمان است، انرژی مصرفی یک وظیفه در فرکانس z به صورت (۳) می‌باشد

$$E_i = p_s + (p_{ind} + c_{ef} z^a) \times \frac{c_i}{z} \quad (3)$$

از این رو مصرف کل انرژی وظیفه T_i هنگامی که در فرکانس z اجرا می‌شود می‌تواند به صورت (۴) درآید

۳-۱ مدل وظیفه و سیستم

۳-۱-۱ مدل وظیفه و سیستم

وظایف در کاربردهای بی‌درنگ به طور ذاتی به صورت دوره‌ای هستند؛ از این رو مجموعه‌ای شامل وظیفه دوره‌ای بی‌درنگ $T = [T_1, T_2, \dots, T_n]$ در نظر گرفته می‌شود [۴]. وظایف بر روی یک سیستم چند هسته‌ای که قابلیت DVFS دارد، اجرا می‌شوند. سیستم باید دارای l سطح فرکانس $f_{min} = f_1 < f_2 < \dots < f_l = f_{max}$ باشد. برای سادگی، سطوح فرکانس نسبت به حداکثر فرکانس (f_{max}) نرمالیزه می‌شوند؛ یعنی $l_i \cdot f_{max} = f_i = 1, 0$ درجه بحرانی هر وظیفه را نمایش می‌دهد به طوری که وظایف بحرانی با $l_i = high$ و وظایف غیر بحرانی با $l_i = low$ نشان داده می‌شوند. دو زمان اجرای c_i^{high} و c_i^{low} برای وظایف بحرانی در نظر گرفته شده است به طوری که $c_i^{high} \geq c_i^{low}$ و برای وظایف غیر بحرانی یک زمان اجرای c_i^{low} در نظر گرفته می‌شود. وظایف در این سیستم‌ها مانند سیستم‌های سنتی موعدهای مقرر ضمنی^۱ دارند که برای هر وظیفه با دوره زمانی^۲ آن برابر می‌باشد ($D_i = P_i$)؛ بنابراین هر وظیفه (T_i) توسط پارامترهای (r_i, c_i, p_i, l_i) توصیف می‌شود که r_i زمان انتشار وظیفه، c_i زمان اجرای وظیفه، p_i دوره تناوب (که متناسب با موعدهای مقرر است) و l_i درجه بحرانی هر وظیفه است. بهره‌وری وظیفه T_i به صورت $u_i = c_i / p_i$ تعریف شده و برای وظایف بحرانی $u_i^{high} = c_i^{high} / p_i$ و $u_i^{low} = c_i^{low} / p_i$ و برای وظایف غیر بحرانی که فقط یک زمان اجرا دارند $u_i^{low} = c_i^{low} / p_i$ می‌باشد. بهره‌وری یک مجموعه وظیفه مشخص از جمع بهره‌وری‌های آن مجموعه وظیفه به دست می‌آید [۲۹].

سیستم دو وضعیت مختلف دارد که $M_{sys} = low$ وضعیت سیستم در حالت غیر بحرانی و $M_{sys} = high$ وضعیت سیستم در حالت بحرانی را نشان می‌دهد. سیستم در حالت عادی و در وضعیت $M_{sys} = low$ شروع به کار کرده و چنانچه یکی از وظایف بحرانی به زمانی بیشتر از c_i^{low} نیاز داشته باشد، سیستم وضعیت عملیاتی خود را به $M_{sys} = high$ تغییر می‌دهد. در این حالت برای تضمین اجرای وظایف بحرانی، وظایف

3. Power Consumption
4. Static Power Consumption
5. Dynamic Power Consumption
6. Frequency-Dependent Active Power
7. Frequency-Independent Active Power

1. Implicit Deadline
2. Period

الگوریتم پویا، از زمان رزرو شده برای وظایف بحرانی ($t = c_i^{high} - c_i^{low}$) برای کاهش بیشتر فرکانس و بهبود انرژی مصرفی استفاده شده است. در این الگوریتم در صورت اجرای موفق وظایف بحرانی (در زمان c_i^{low})، از زمان بیکاری به وجود آمده ($t = c_i^{high} - c_i^{low}$) برای کاهش بیشتر فرکانس استفاده شده است. اما این راه حل در سیستم تک پردازنده ای معرفی گردیده است. از این رو، این پژوهش گسترش یافته آخرین مطالعه ما [۱] با نگاشت مناسب وظایف در سیستم های چند هسته ای می باشد. بنابراین مسئله اصلی به این صورت بیان می شود که در یک سیستم نهفته بی درنگ با بحرانیت مختلط در محیط متشکل از پردازنده چند هسته ای، وظایف چگونه زمان بندی شوند تا ضمن استفاده از تکنیک تغییر پویای ولتاژ برای کاهش انرژی مصرفی، محدودیت زمانی وظایف نیز ارضا شود. برای رسیدن به این هدف مراحل زیر انجام خواهد شد:

(۱) نگاشت وظایف

(۲) محاسبه پارامترهای لازم (محاسبه فاکتور X و فرکانس کاری وظایف) برای زمان بندی وظایف با بحرانیت مختلط

(۳) دخیل نمودن زمان بندی در کنار روش کاهش انرژی مصرفی

در اولین مرحله، روش های ارائه شده برای نگاشت وظایف در سیستم های بحرانی- مختلط چند هسته ای معرفی شده و روش پیشنهادی با تمام این روش ها ارزیابی می گردد. در مرحله دوم که به صورت ایستا می باشد، پارامترهای لازم برای زمان بندی در سیستم های بحرانی- مختلط به دلیل وجود وظایف با درجه اهمیت متفاوت محاسبه می شود. در آخرین مرحله که قسمت دینامیک روش پیشنهادی می باشد با روش زمان بندی برخط معرفی شده در [۱] و استفاده از زمان های بیکاری ایجاد شده (که در حین اجرای وظایف ایجاد می شود)، فرکانس کاری و انرژی مصرفی کاهش می یابد. بنابراین راهکار پیشنهادی در ابتدا نیازمند بازنمایی مسئله و سپس حل زیرمسائل مختلف است که در ادامه معرفی خواهند شد.

۴-۱- بازنمایی مسئله

برای زمان بندی صحیح وظایف و کاهش مصرف انرژی در سیستم های بحرانی- مختلط، ابتدا باید عامل های اصلی مسئله را معرفی نمود. این بازنمایی باید به گونه ای باشد که بتوان پارامترهای دخیل در مسئله را بیان و زمان بندی و کاهش انرژی مصرفی را به عنوان تابعی از این پارامترها تعریف کرد. بنابراین مسئله در قالب پنج تایی زیر بیان می شود

$$problem(T_s, M_{sys}, f_i, E_{sys}) \quad (5)$$

که پارامترهای مختلف آن عبارتند از

- مدل وظیفه (T_s): نشان دهنده وظایفی است که اجرا خواهند شد. این وظایف در بخش ۳-۱ به طور کامل توضیح داده شده است.
- وضعیت سیستم (M_{sys}): وضعیت سیستم را نشان می دهد. برای سیستم بحرانی- مختلط با دو وضعیت کاری مختلف، وضعیت سیستم در حالت غیر بحرانی با $M_{sys} = low$ و وضعیت سیستم در حالت بحرانی با $M_{sys} = high$ نشان داده می شود. ابتدا سیستم در $M_{sys} = low$ شروع به کار کرده و چنانچه وظیفه بحرانی به زمانی بیشتر از c_i^{low} نیاز داشته باشد وضعیت خود را تغییر داده و $M_{sys} = high$ می شود. در این حالت وظایف غیر بحرانی برای تضمین اجرای وظایف بحرانی حذف خواهند شد.
- فرکانس کاری وظیفه (f_i): فرکانس هر وظیفه در وضعیت های

$$E_i = P_s + (p_{ind} + C_{ef} z^a) \times \frac{C_i}{z} \quad (4)$$

۳-۳- زمان بندی در سیستم های بحرانی- مختلط

در سیستم های بحرانی- مختلط و بر طبق ادعای مطرح شده در [۱۶]، وجود وظایف با درجه بحرانی متفاوت باعث می شود که روش های رایج زمان بندی مثل EDF [۳۵] کارا نباشند. بنابراین در سیستم های بحرانی- مختلط به الگوریتمی برای زمان بندی نیاز است که ضمن اجرای به موقع وظایف، شرایط لازم را برای اجرای وظایف بحرانی در صورت تغییر وضعیت سیستم فراهم نماید و به همین علت الگوریتم های مختلفی برای زمان بندی سیستم های بحرانی- مختلط معرفی شده اند. الگوریتم OCBP [۹] یک الگوریتم اولویت ثابت بر اساس درجه بحرانی وظایف است. این الگوریتم توسعه یافته الگوریتم اولویت ثابت Audsley [۳۶] بوده که برای اولویت بندی وظایف، درجه بحرانی بودن آنها را هم در نظر می گیرد. الگوریتم CBEDF [۸] با هدف استفاده از زمان بیکاری وظایف بحرانی، برای اجرای وظایف غیر بحرانی معرفی شده است. این الگوریتم شامل دو زیر الگوریتم می باشد که یکی برای مشخص کردن زمان های بیکاری قبل از اجرا و دیگری زمان بندی وظایف در طول اجراست که خود، شامل دو صف یکی برای وظایف بحرانی و دیگری برای وظایف غیر بحرانی می باشد. در آخر نشان داده شده که این الگوریتم بهتر از OCBP عمل می کند. همچنین EDF-VD [۷] با هدف ایجاد مهلت زمانی مجازی (VD) جهت تضمین اجرای به موقع وظایف بحرانی معرفی شده است. این الگوریتم پارامتر X را به کمک بهره وری^۴ وظایف محاسبه می نماید و با ضرب این مقدار در مهلت زمانی وظایف بحرانی، یک مهلت زمانی مجازی برای این وظایف در نظر گرفته و سپس تمام وظایف طبق الگوریتم EDF زمان بندی می شوند. در این الگوریتم چنانچه وظایف بحرانی نیاز به زمانی بیشتر از آنچه طراح مشخص کرده، داشته باشند، وظایف غیر بحرانی به جهت تضمین رفتار به موقع وظایف بحرانی، قربانی می شوند. برخلاف روش های زمان بندی ذکر شده که در صورت تغییر سیستم از حالت غیر بحرانی به حالت بحرانی، وظایف غیر بحرانی حذف می شوند، [۱۹] با ارائه الگوریتم ER-EDF از زمان بیکاری وظایف بحرانی برای اجرای وظایف غیر بحرانی استفاده کرده است. این الگوریتم با افزایش دوره تناوب وظایف غیر بحرانی (که توسط حداقل نیاز سرویس^۵ وظیفه مشخص می شود) و بدون دخالت در اجرای وظایف بحرانی، آنها را زمان بندی می کند. نتایج این پژوهش در مقایسه با روش های زمان بندی ذکر شده، اجرای وظایف بیشتری را نشان داده است. در این پژوهش مشابه با [۵]، [۳۰] و [۳۱] از الگوریتم EDF-VD برای زمان بندی وظایف استفاده گردیده است. این زمان بندی با ذکر مثالی در [۱] بیشتر توضیح داده شده است.

۴- راهکار پیشنهادی

طبق آنچه بیان شد، علاوه بر زمان بندی درست سیستم های بحرانی- مختلط، از آنجا که این سیستم ها عموماً مبتنی بر باتری هستند، کاهش مصرف انرژی یک نیاز ضروری است. در آخرین کار ما [۱] با ارائه یک

1. Early Deadline First
2. Audsley's Priority-Based Real-Time Scheduling
3. Virtual Deadlines
4. Utilization
5. Minimum Service Requirement

ترجیح داده می‌شوند [۳۸]. نکته مهمی که باید در نظر گرفته شود این است که راهکارهای مدیریت انرژی سیستم به میزان زمان بیکاری موجود وابسته است و هنگامی که این زمان بیکاری ناکافی باشد (مهلت زمانی ضیق^۴ باشد)، راهکارهای مدیریت انرژی به‌خوبی نمی‌توانند انرژی مصرفی مصرفی را کاهش دهند. بنابراین روشی برای نگاشت وظایف در سیستم‌های بحرانی - مختلط نیاز است که ضمن در نظر گرفتن وظایف با درجه بحرانبند مختلط با متعادل کردن وظایف بر روی پردازنده‌ها بیشترین زمان بیکاری را برای کاهش دادن انرژی مصرفی ایجاد نماید. روش‌هایی برای نگاشت وظایف در سیستم‌های بحرانی - مختلط وجود دارد [۲۱]، [۲۲] و [۳۰] که در ادامه بررسی می‌شوند. به‌منظور مقایسه و پیدا کردن بهترین روش (که بیشترین زمان بیکاری را ایجاد می‌کند)، از تمام این روش‌ها در قسمت ارزیابی استفاده خواهد شد. مرجع [۲۱] (Baruah's method) با استفاده از زمان‌بندی بخش‌بندی‌شده، وظایف را بین پردازنده‌ها تقسیم و برای زمان‌بندی هر پردازنده از الگوریتم EDF-VD استفاده می‌کند. در این مقاله، ابتدا تمام وظایف بحرانی بر روی پردازنده‌های متفاوت توسط روش اولین برازش^۵ و سپس وظایف غیربحرانی بر روی پردازنده‌های باقیمانده توسط روش اولین برازش تقسیم می‌شوند. این روش به‌خاطر استفاده از الگوریتم اولین برازش، بهره‌وری سیستم را افزایش می‌دهد؛ ولی برای کاهش انرژی مصرفی که نیازمند زمان بیکاری است، مناسب نیست. مرجع [۲۲] (Gu's method) نیز مشابه [۲۱] از زمان‌بندی بخش‌بندی‌شده برای تقسیم وظایف بین پردازنده‌ها بهره برده و برای زمان‌بندی هر پردازنده از الگوریتم زمان‌بندی [۷] استفاده کرده است. در این روش ابتدا تمام وظایف بحرانی بر روی پردازنده‌های متفاوت توسط روش بدترین برازش^۶ و سپس وظایف غیربحرانی بر روی پردازنده‌های باقیمانده توسط روش اولین برازش تقسیم می‌شوند. این روش به‌دلیل استفاده از الگوریتم اولین برازش برای وظایف غیربحرانی، بهره‌وری سیستم را افزایش داده است؛ اما برخلاف [۲۱] به‌دلیل توزیع متعادل وظایف بحرانی بر روی هسته‌ها و وجود زمان بیکاری بیشتر برای کاهش انرژی مصرفی مناسب است. بنابراین در [۳۰] (EM^۳) با متعادل کردن وظایف بر روی پردازنده‌ها و به‌منظور ایجاد بیشترین زمان بیکاری برای کاهش انرژی مصرفی، تمام وظایف توسط روش بدترین برازش بر روی پردازنده‌های متفاوت نگاشت می‌شوند. ابتدا تمام وظایف بحرانی و سپس وظایف غیربحرانی بر روی پردازنده‌های باقیمانده نیز تقسیم می‌شوند.

۴-۲-۲ محاسبه فاکتور X و فرکانس کاری وظایف

طبق بخش ۳-۳، این مقاله از الگوریتم EDF-VD برای زمان‌بندی وظایف استفاده می‌کند که در آن با محاسبه پارامتر X ، یک مهلت زمانی مجازی برای وظایف بحرانی در نظر گرفته شده و سپس تمام وظایف طبق الگوریتم EDF زمان‌بندی می‌شوند. از آنجا که X بر اساس زمان اجرا و بهره‌وری وظایف محاسبه می‌گردد و استفاده از DVFS منجر به افزایش زمان اجرای وظایف می‌شود، بعد از اعمال روش DVFS، محاسبه مجدد X (X') ضروری است. بنابراین X' از (۹) محاسبه می‌شود

$$X' \geq \frac{U_{high}^{low}}{1 - U_{low}^{low}} \quad (9)$$

مختلط سیستم را نشان می‌دهد. بنابراین در حالت $M_{sys} = low$ یک فرکانس کاری برای وظایف غیربحرانی (f_{low}^{low}) و یک فرکانس کاری برای وظایف بحرانی (f_{high}^{low}) در نظر گرفته می‌شود. در حالت $M_{sys} = high$ که وظایف غیربحرانی حذف شده‌اند، فقط یک فرکانس کاری برای وظایف بحرانی (f_{high}^{high}) در نظر گرفته می‌شود.

- تعداد هسته‌ها (n): نشان‌دهنده تعداد هسته‌های سیستم است. وجود هسته‌های اضافه منجر به ایجاد زمان بیکاری بیشتر برای کاهش انرژی مصرفی می‌شود؛ لذا تعداد هسته‌ها تأثیر بسزایی بر ارزیابی طرح پیشنهادی دارد.

- انرژی سیستم (E_{sys}): انرژی مصرفی یک وظیفه، توان مصرفی در زمان سپری‌شده برای اجرای وظیفه است که به‌صورت (۶) می‌باشد

$$E_{sys} = E_{LO} + E_{HI} \quad (6)$$

که E_{LO} نشان‌دهنده انرژی مصرفی در $M_{sys} = low$ بوده و از (۷) محاسبه می‌شود

$$E_{LO} = \sum_{T_i \in T_{LO}} \frac{c_i(LO)}{f_i^{LO}} (p_s + p_d) \quad (7)$$

و E_{HI} نشان‌دهنده انرژی مصرفی در $M_{sys} = high$ بوده و از (۸) محاسبه می‌شود

$$E_{HI} = \sum_{T_i \in T_{HI}} \frac{c_i(HI)}{f_i^{HI}} (p_s + p_d) \quad (8)$$

بنابراین وظایف برای یک ابردوره^۱ (کوچک‌ترین مضرب مشترک دوره همه وظایف) زمان‌بندی و مقدار انرژی مصرفی (در یک ابردوره) محاسبه می‌شود.

۴-۲-۲ فازهای لازم برای حل مسئله اصلی

برای حل مسئله کاهش مصرف انرژی و تضمین اجرای به‌موقع وظایف در سیستم‌های بحرانی - مختلط متشکل از پردازنده‌های چند هسته‌ای، بعد از بازنمایی مسئله حل فازهای زیر ضروری است:

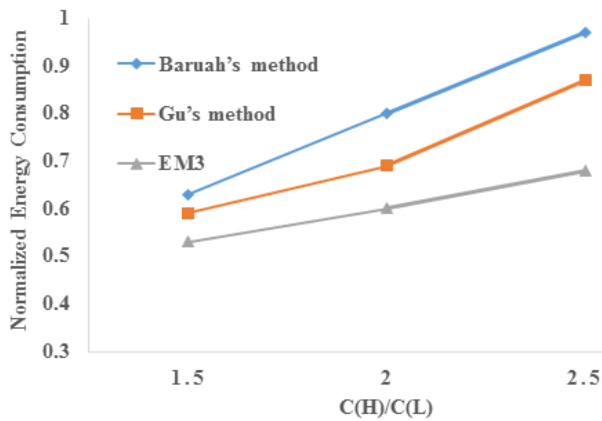
- نگاشت وظایف
- محاسبه فاکتور X برای تولید موعد مقرر مجازی (VD) برای وظایف بحرانی
- محاسبه فرکانس برای وظایف غیربحرانی در $M_{sys} = low$ با توجه به مهلت زمانی وظایف
- محاسبه فرکانس برای وظایف بحرانی در $M_{sys} = low$ و برای همین وظایف در $M_{sys} = high$ با توجه به مهلت زمانی وظایف
- دخیل‌نمودن زمان‌بندی در کنار روش کاهش انرژی مصرفی

۴-۲-۱ نگاشت وظایف در سیستم‌های بحرانبند مختلط

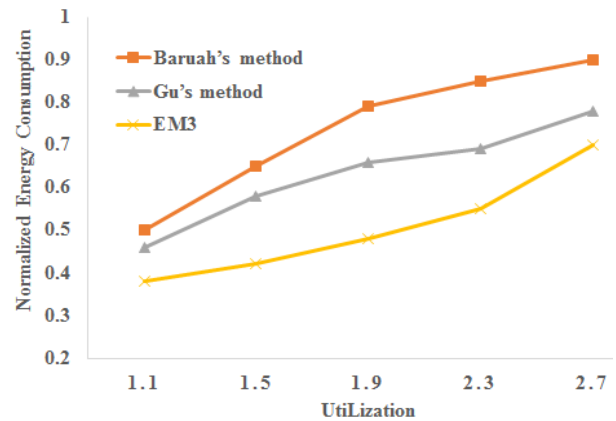
برای نگاشت وظایف بی‌درنگ در سیستم‌های چند هسته‌ای، الگوریتم‌های زیادی وجود دارند که این روش‌ها به دو دسته سراسری^۲ و بخش‌بندی‌شده^۳ تقسیم می‌شوند [۳۷] و [۳۸]. در نگاشت سراسری، یک وظیفه ممکن است بر روی پردازنده‌های مختلفی اجرا شود؛ اما در نگاشت بخش‌بندی‌شده، وظیفه بر روی یک پردازنده خاص اجرا می‌شود. به‌خاطر سادگی و کارایی، الگوریتم‌های بخش‌بندی‌شده به الگوریتم‌های سراسری

4. Tight
5. First-Fit
6. Worst-Fit

1. Hyperperiod
2. Global
3. Partitioned



شکل ۲: انرژی مصرفی بر اساس زمان رزرو سیستم (پارامتر μ).



شکل ۱: انرژی مصرفی بر اساس بهره‌وری وظایف.

رزرو سیستم و نسبت c_i^{high} به c_i^{low} است) بین ۱/۵ تا ۲/۵ می‌باشد. بنابراین در هر بار شبیه‌سازی، ۱۰۰۰ مجموعه تصادفی وظایف تولید شده و مقدار انرژی مصرفی در یک ابردوره به صورت نرمال شده در سیستم با ۴ هسته محاسبه می‌گردد. سپس روش پیشنهادی با استفاده از روش‌های نگاشت وظایف معرفی شده بخش ۴-۲-۱ ارزیابی و در انتها با روش ارائه شده در [۳۰] مقایسه خواهد گردید.

۵-۱ مقدار انرژی مصرفی بر اساس بهره‌وری وظایف

شکل ۱ انرژی مصرفی را بر اساس بهره‌وری وظایف که از ۱/۱ تا ۲/۷ متغیر است (با روش‌های مختلف نگاشت وظایف) نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش بار کاری سیستم، انرژی مصرفی در تمام روش‌ها افزایش می‌یابد. علت این امر، کاهش زمان بیکاری به دلیل افزایش بار کاری سیستم می‌باشد. لازم به ذکر است که هرچه زمان بیکاری کمتر باشد، کاهش فرکانس برای صرفه‌جویی انرژی مصرفی نیز اندک خواهد بود. با این حال با افزایش بهره‌وری وظایف، انرژی مصرفی روش EM3 نسبت به سایر روش‌ها کمتر است که علت اصلی آن، متعادل کردن بار کاری پردازنده‌ها است که منجر به استفاده بهینه از زمان بیکاری می‌شود.

۵-۲ مقدار انرژی مصرفی بر اساس زمان رزرو سیستم (پارامتر μ)

شکل ۲ انرژی مصرفی را برای مقادیر مختلف μ (۱/۵ تا ۲/۵) با فرض $U_{low}^{low} = 0.6$ و $U_{high}^{low} = 0.5$ نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان رزرو که منجر به افزایش بار کاری سیستم خواهد شد، انرژی مصرفی در تمام روش‌ها افزایش می‌یابد. علت این امر، کاهش زمان بیکاری به دلیل افزایش بار کاری سیستم است (هرچه زمان بیکاری کمتر باشد، کاهش فرکانس برای صرفه‌جویی انرژی مصرفی نیز اندک خواهد بود). همان طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش μ ، میزان انرژی مصرفی در روش EM3 نسبت به سایر روش‌ها کمتر می‌شود. علت این امر متعادل بودن بار کاری پردازنده‌ها در روش EM3 و استفاده بهینه از زمان بیکاری است.

۵-۳ مقدار انرژی مصرفی بر اساس تعداد وظایف

شکل ۳ انرژی مصرفی را بر اساس تعداد وظایف در شرایطی که $U_{low}^{low} = 0.7$ و $U_{high}^{high} = 0.7$ است، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که افزایش وظایف، تأثیر چندانی بر انرژی مصرفی ندارد. علت این امر وابسته بودن انرژی مصرفی به بهره‌وری وظایف است و نه تعداد وظایف.

که در آن U' بهره‌وری وظایف بعد از اعمال روش DVFS می‌باشد و از (۱۰) محاسبه می‌شود

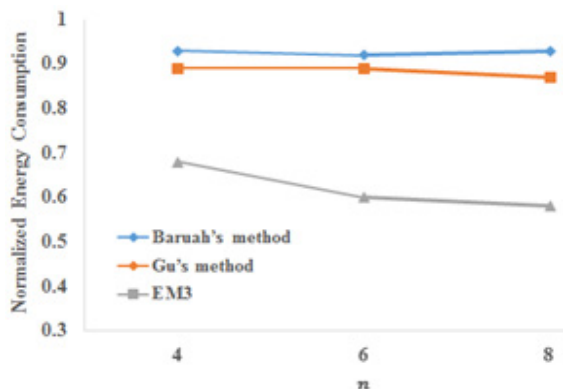
$$U' = \frac{c_i}{P_i \times f_i} \quad (10)$$

همچنین طبق آنچه در بخش ۴-۱ در مورد وضعیت سیستم (M_{sys}) و فرکانس کاری وظایف (f_i) توضیح داده شد، سیستم در دو وضعیت بحرانی ($M_{sys} = high$) و غیربحرانی ($M_{sys} = low$) فعالیت خواهد داشت. بر همین اساس در حالت $M_{sys} = low$ یک فرکانس کاری برای وظایف غیربحرانی (f_{low}^{low}) و یک فرکانس کاری برای وظایف بحرانی (f_{high}^{low}) در نظر گرفته می‌شود. در حالت ($M_{sys} = high$) که وظایف غیربحرانی حذف شده‌اند، فقط یک فرکانس کاری برای وظایف بحرانی (f_{high}^{high}) در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که انرژی سیستم وابسته به فرکانس و زمان اجرای وظیفه است با کاهش فرکانس، انرژی مصرفی سیستم کاهش چشم‌گیری خواهد داشت. بنابراین می‌توان از زمان رزرو در نظر گرفته شده برای وظایف بحرانی برای کاهش بیشتر فرکانس وظایف استفاده نمود. از این رو در حالت $M_{sys} = low$ این زمان رزرو به زمان بیکاری سیستم افزوده می‌شود که برای کاهش بیشتر فرکانس و کاهش انرژی مصرفی سیستم مناسب است. بنابراین اگر U_i بهره‌وری به‌روز شده وظایف در صورت اتمام وظایف بحرانی در f_{ee}^{low} و c_i^{low} فرکانس بحرانی یا فرکانس انرژی کارآمد باشد [۱]، فرکانس جدید پردازنده (f_i') طبق (۱۱) محاسبه می‌شود

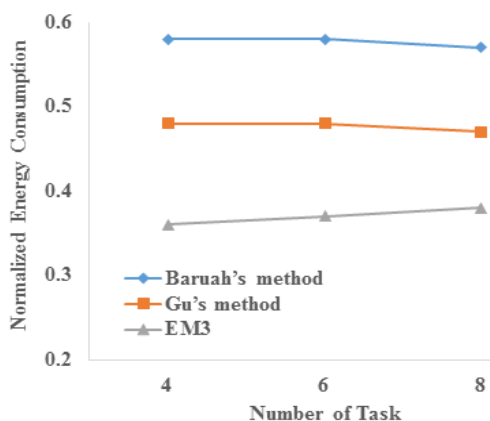
$$f_i' = \max\{f_{ee}, f_i \times U_i\} \quad (11)$$

۵-۴ ارزیابی راهکار پیشنهادی

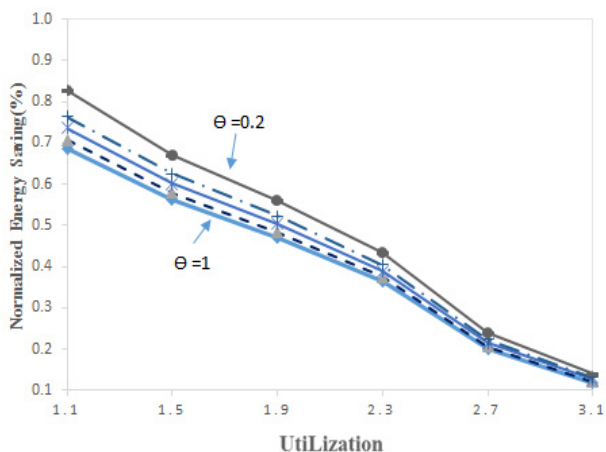
روش ارائه شده مشابه [۱] و [۱۹] با شبیه‌سازی بر روی وظایفی که به صورت تصادفی تولید شده و نیز وظایف کاربردی FMS^۱ [۳۰] (که شامل ۷ وظیفه با بحرانیات بالا و ۴ وظیفه با بحرانیات پایین می‌باشد) ارزیابی شده است. ویژگی وظایفی که به صورت تصادفی تولید می‌شوند مشابه [۱۹] می‌باشد که از روش‌های معروف تولید وظایف در سیستم‌های بحرانی-مختلط هستند. بنابراین با توجه به این ویژگی‌ها، موعد مقرر وظایف بین ۱۰ تا ۱۰۰ و بهره‌وری وظایف بین ۰/۲ تا ۰/۴ در نظر گرفته شده است. سپس بر اساس موعد مقرر و بهره‌وری انتخاب شده، زمان اجرای وظایف محاسبه می‌شود. برای وظایف بحرانی، مقدار زمان رزرو ($t = c_i^{high} - c_i^{low}$) به صورت $c_i^{low} = \mu c_i^{high}$ تعریف می‌شود که μ (زمان



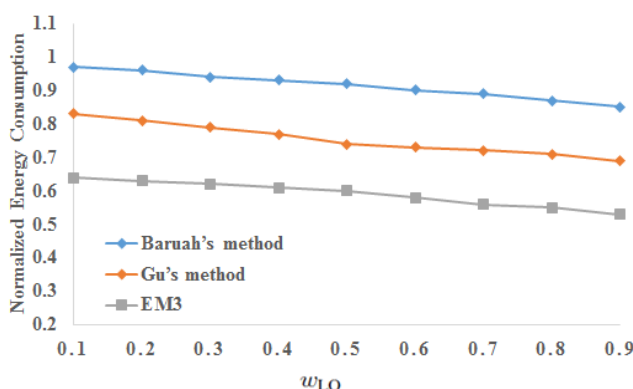
شکل ۵: انرژی مصرفی بر اساس تعداد هسته‌ها.



شکل ۳: انرژی مصرفی بر اساس تعداد وظایف.



شکل ۶: انرژی مصرفی بر اساس اثر انرژی استاتیک.



شکل ۴: انرژی مصرفی بر اساس احتمال تغییر وضعیت سیستم.

پرداخته شد. اکنون اثر تعداد هسته‌ها بر انرژی مصرفی سیستم، ارزیابی می‌شود. شکل ۵ انرژی ذخیره‌شده سیستم را با هسته‌های مختلف نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در روش‌های Baruah و Gu تعداد هسته‌ها بر انرژی مصرفی سیستم اثر مستقیمی ندارد. علت این امر استفاده از الگوریتم اولین برازش برای نگاشت وظایف است. این الگوریتم بهره‌وری سیستم را افزایش می‌دهد؛ ولی برای کاهش انرژی مصرفی که نیازمند زمان بیکاری است، مناسب نیست. اما میزان انرژی مصرفی در روش EM3 نسبت به سایر روش‌ها کمتر می‌باشد. علت این امر استفاده از الگوریتم بدترین برازش و استفاده بهینه از زمان بیکاری است.

۵-۶ مقدار انرژی مصرفی بر اساس اثر انرژی استاتیک

در این قسمت اثر توان مصرفی استاتیک بر انرژی مصرفی سیستم ارزیابی می‌شود. شکل ۶ انرژی ذخیره‌شده سیستم با در نظر گرفتن $ps = \theta \cdot p_d$ [۱۹] و [۲۶] را نشان می‌دهد که θ از ۰.۲ تا ۱ با طول گام ۰.۲ متغیر می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود توان مصرفی استاتیک نقشی بسزا در ذخیره انرژی مصرفی دارد و با افزایش این مقدار، میزان انرژی ذخیره‌شده تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

۵-۷ مقایسه با روش ارائه‌شده در [۳۰]

در بخش‌های قبلی، انرژی مصرفی سیستم با استفاده از روش‌های متفاوت نگاشت وظایف (معرفی‌شده در بخش ۴-۲-۱) ارزیابی شده است. در [۳۰] روشی برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم چندپردازنده‌ای ارائه گردیده است. در این مقاله بعد از نگاشت وظایف، طبق الگوریتم ارائه‌شده در [۳۱] فرکانس کاری هر وظیفه به صورت ایستا مشخص شده و وظایف بر اساس این فرکانس اجرا می‌شوند. اما به دلیل ایستابودن این الگوریتم،

۵-۴ مقدار انرژی مصرفی بر اساس احتمال تغییر وضعیت سیستم

با توجه به احتمال قرارگرفتن سیستم در حالات مختلف، بررسی انرژی سیستم تنها در $M_{sys} = low$ مناسب نیست و به همین علت با گذشت زمان، احتمال تغییر وضعیت (از $M_{sys} = low$ به $M_{sys} = high$) افزایش پیدا می‌کند. به منظور بررسی کردن انرژی در حالات مختلف سیستم، پارامتر w_{LO} برای $M_{sys} = low$ و پارامتر w_{HI} برای $M_{sys} = high$ در نظر گرفته می‌شود؛ به طوری که $w_{LO}, w_{HI} \in [0, 1]$ می‌باشد. این پارامترها، انرژی مصرفی را در حالات مختلف سیستم نشان می‌دهند. در $M_{sys} = low$ ، $w_{HI} = 1 \wedge w_{LO} = 0$ و به طور مشابه در $M_{sys} = high$ ، $w_{LO} = 1 \wedge w_{high} = 0$ است؛ بنابراین با توجه به (۶)، انرژی مصرفی سیستم طبق (۱۲) تعریف می‌شود

$$E = w_{LO} \times E_{LO} + w_{HI} \times E_{HI} \quad (12)$$

شکل ۴ انرژی مصرفی سیستم را به ازای مقادیر مختلف $w_{LO} \in [0, 1]$ با طول گام ۰.۱ نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر w_{LO} ، انرژی مصرفی سیستم کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش w_{LO} از ۰ به ۱، سیستم بیشتر در $M_{sys} = low$ فعال بوده که در این حالت از تکنیک DVFS برای کاهش انرژی مصرفی استفاده می‌شود.

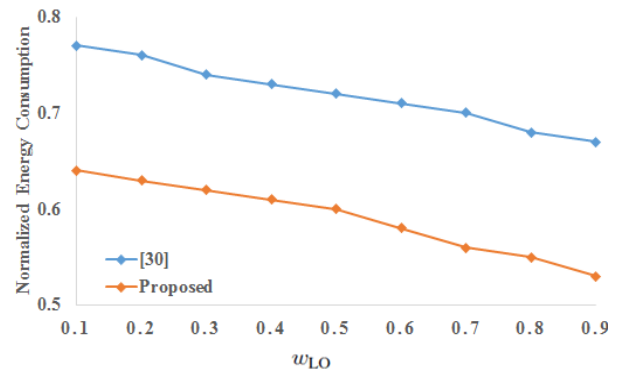
۵-۵ مقدار انرژی مصرفی بر اساس تعداد هسته‌ها

تعداد هسته‌ها یکی از پارامترهای ارزیابی است که تأثیر بسزایی در ایجاد زمان بیکاری و کاهش انرژی مصرفی دارد. در بخش‌های قبلی به ارزیابی سیستم با ۴ هسته (با توجه به پارامترهای معرفی‌شده در ارزیابی)

غیربحرانی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که زمان‌بندی پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مشابه، عملکرد بهتری از خود نشان داده و انرژی مصرفی را تا ۳۰ درصد بهبود می‌بخشد.

مراجع

- [۱] س. ج. صادق‌زاده و ی. صداقت، "زمان‌بندی آگاه از انرژی مصرفی برای سیستم‌های بی‌درنگ تک‌پردازنده‌ای بحرانی-مختلط"، نشریه علمی-پژوهشی نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۶، شماره ۴، صص. ۳۳۴-۳۲۷، زمستان ۱۳۹۷.
- [2] D. Zhu, "Reliability-aware dynamic energy management in dependable embedded real-time systems," *ACM TECS*, vol. 10, no. 2, Article ID: 26, 27 pp., Dec. 2011.
- [3] P. Marwedel, *Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems*, Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [4] H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [5] S. Baruah, et al., "Scheduling real-time mixed-criticality jobs," *IEEE Trans. on Computers*, vol. 61, no. 8, pp. 1140-1152, Aug. 2012.
- [6] F. Santy, L. George, P. Thierry, and J. Goossens, "Relaxing mixed-criticality scheduling strictness for task sets scheduled with FP," in *Proc. Euromicro Conf. on Real-Time Systems, ECRTS'12*, pp. 155-165, Pisa, Italy, 11-13 Jul. 2012.
- [7] S. Baruah, et al., "The preemptive uniprocessor scheduling of mixed-criticality implicit-deadline sporadic task systems," in *Proc. Euromicro Conf. on Real-Time Systems, ECRTS'12*, pp. 145-154, Pisa, Italy, 11-13 Jul. 2012.
- [8] P. Taeju and K. Soontae, "Dynamic scheduling algorithm and its schedulability analysis for certifiable dual-criticality systems," in *Proc. Int. Conf. Embedded Software, EMSOFT'11*, pp. 253-262, Taipei Taiwan, 9-14 Oct. 2011.
- [9] S. Baruah, H. Li, and L. Stougie, "Towards the design of certifiable mixed-criticality systems," in *Proc. 16th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp.*, pp. 13-22, Stockholm, Sweden, 12-15 Apr. 2010.
- [10] P. Huang, H. Yang, and L. Thiele, "On the scheduling of fault-tolerant mixed-criticality systems," in *Proc. Design Automation Conf. (DAC), ACM/EDAC/IEEE, DAC'14*, 6 pp., 1-5 Jun. 2014.
- [11] S. Baruah and S. Vestal, "Schedulability analysis of sporadic tasks with multiple criticality specifications," in *Proc. Euromicro Conf. on Real-Time Systems, ECRTS'08*, pp. 147-155, Prague, Czech Republic, 2-4 Jul. 2008.
- [12] Z. Lia, C. Guo, X. Hua, and S. Ren, "Reliability guaranteed energy minimization on mixed-criticality systems," *J. of Syst. and Software*, vol. 112, pp. 1-10, Feb. 2016.
- [13] H. Su, D. Zhu, and S. Brandt, "An elastic mixed-criticality task model and early-release EDF scheduling algorithms," *ACM TODAES*, vol. 22, no. 2, Article ID: 28, 28 pp., Apr. 2017.
- [14] A. Thekkilakattil, R. Dobrin, and S. Punnekkat, "Fault-tolerant scheduling of mixed-criticality real-time tasks under error bursts," *Procedia Computer Science*, vol. 46, pp. 1148-1155, 2015.
- [15] P. Ekberg and W. Yi, "Bounding and shaping the demand of mixed-criticality sporadic tasks," in *Proc. 24th Euromicro Conference on Real-Time Systems, ECRTS*, pp. 135-144, Pisa, Italy, 11-13 Jul. 2012.
- [16] S. Vestal, "Preemptive scheduling of multi-criticality systems with varying degrees of execution time assurance," in *Proc. 28th IEEE Int. Real-Time Systems Symp.*, pp. 239-243, Tucson, AZ, USA, 3-6 Dec. 2007.
- [17] J. Lin, A. M. K. Cheng, D. Steel, and M. Yu-Chi Wu, "Scheduling mixed-criticality real-time tasks in a fault-tolerant system," *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems*, vol. 6, no. 2, 22 pp., 2015.
- [18] C. Kamienski, et al., "Application development for the Internet of Things: a context-aware mixed criticality systems development platform," *Computer Communications*, vol. 104, pp. 1-16, 15 May 2017.
- [19] A. Taherin, M. Salehi, and A. Ejlali, "Reliability-aware energy management in mixed-criticality systems," *IEEE Trans. on Sustainable Computing*, vol. 3, no. 3, pp. 195-208, Jul.-Sept. 2018.
- [20] M. Salehi, A. Ejlali, and B. M. Al-Hashimi, "Two-phase low-energy N-modular redundancy for hard real-time multi-core systems," *IEEE TPDS*, vol. 27, no. 5, pp. 1497-1510, May 2015.



شکل ۷: انرژی مصرفی با استفاده از وظایف FSM.

جدول ۲: پارامترهای وظایف کاربردی FMS.

t	Criticality	T_i (ms)	C_i (LO)(ms)	C_i (HI)(ms)
t_1	HI	5000	15	21
t_2	HI	200	25	36
t_3	HI	1000	16	22
t_4	HI	1600	20	28
t_5	HI	100	20	35
t_6	HI	1000	17	24
t_7	HI	1000	15	21
t_8	LO	1000	100	100
t_9	LO	1000	180	180
t_{10}	LO	1000	140	140
t_{11}	LO	1000	100	100

نمی‌توان از زمان‌های بیکاری ایجادشده در حین اجرای وظایف برای کاهش بیشتر فرکانس کاری وظایف استفاده نمود. شکل ۷ انرژی مصرفی را با استفاده از وظایف FSM به‌ازای مقادیر مختلف w_{LO} از ۰ به ۱ نشان می‌دهد. این وظایف طبق جدول ۲ هستند. با توجه به این شکل، انرژی مصرفی روش پیشنهادی در مقایسه با [۳۰] کمتر می‌باشد. علت آن است که در روش پیشنهادی با یک روش زمان‌بندی برخط از زمان بیکاری ایجادشده (که در حین اجرای وظایف ایجاد می‌شود) برای کاهش بیشتر فرکانس کاری وظایف استفاده می‌شود که کاهش انرژی مصرفی را به دنبال دارد.

۶- نتیجه‌گیری

سیستم‌های بحرانی-مختلط در حوزه‌های مختلفی کاربرد دارند و اجرای به‌موقع وظایف با محدودیت زمانی و کاهش انرژی مصرفی به‌عنوان مسائل مهم در این سیستم‌ها مطرح است. به‌علاوه پردازنده‌های چند هسته‌ای به‌دلیل قدرت محاسباتی بالا و افزایش کارایی به‌طور گسترده در سیستم‌های نهفته مورد استفاده قرار گرفته‌اند و انتخاب مناسبی برای سیستم‌های نهفته با بحرانی‌ت مختلط هستند. از این رو به‌منظور دستیابی به زمان‌بندی بی‌درنگ همراه با کاهش انرژی مصرفی، یک روش زمان‌بندی ابتکاری برای کاهش انرژی مصرفی در این سیستم‌ها معرفی شده است. این الگوریتم انرژی مصرفی سیستم را با تغییر پویای ولتاژ و فرکانس (DVFS) کاهش داده و از زمان‌های بیکاری ایجادشده در حین اجرای وظایف برای کاهش بیشتر فرکانس استفاده می‌نماید. در این مقاله هر دو توان مصرفی ایستا و دینامیک در نظر گرفته شد. علاوه بر این، وضعیت سیستم و میزان انرژی مصرفی در هر دو حالت بحرانی و

- [32] V. Moghaddas, M. Fazeli, and A. Patooghy, "Reliability-oriented scheduling for static-priority real-time tasks in standby-sparing systems," *Microprocessors and Microsystems, Pt A*, vol. 45, pp. 208-215, Aug. 2016.
- [33] V. Legout, M. Jan, and L. Pautet, "Mixed-criticality multiprocessor real-time systems: energy consumption vs deadline misses," in *Proc. 1st. Workshop on Real-Time Mixed Criticality Syst., ReTiMiCS'13*, 6 pp., Taipei, Taiwan. Aug. 2013.
- [34] M. Völp, M. Hähnel, and A. Lackorzynski, "Has energy surpassed timeliness? scheduling energy-constrained mixed-criticality systems," in *Proc. IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp., RTAS'14*, pp. 275-284, Berlin, Germany, 15-17 Apr. 2014.
- [35] F. Zhang and A. Burns, "Schedulability analysis for real-time systems with EDF scheduling," *IEEE Trans. on Computers*, vol. 58, no. 9, pp. 1250-1258, Sept. 2009.
- [36] N. Audsley, *Optimal Priority Assignment and Feasibility of Static Priority Tasks with Arbitrary Start Times*, Dept. of Comp. Sci., University of York, UK, 1991.
- [37] A. K. Singh, M. Shafiq, A. Kumar, and J. Henkel, "Mapping on multi-/many-core systems: Survey of current and emerging trends," in *Proc. of 50th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conf., DAC'13*, pp. 275-284, Austin, TX, USA, 29 May-7 Jun. 2013.
- [38] A. Bastoni, B. B. Brandenburg, and J. H. Anderson, "An empirical comparison of global, partitioned and clustered multiprocessor EDF schedulers," in *Proc. 31st IEEE Real-Time Systems Symp., RTSS'10*, San Diego, CA, USA, 30 Nov.-3 Dec. 2010.
- [21] S. Baruah, C. Bipasa, L. Haohan, and S. Insik, "Mixed-criticality scheduling on multiprocessors," *Real-Time Systems*, vol. 50, no. 1, pp. 142-177, Jan. 2014.
- [22] C. Gu, G. Nan, D. Qingxu, and Y. Wang, "Partitioned mixed-criticality scheduling on multiprocessor platforms," in *Proc. Design, Automation & Test in Europe Conf. & Exhibition, DATE'14*, 6 pp., Dresden, Germany, 24-28 Mar. 2014.
- [23] Y. Zhang and K. Chakrabarty, "Dynamic adaptation for fault tolerance and power management in embedded real-time systems," *ACM Trans. on Embedded Computing Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 336-360, May 2004.
- [24] L. Benini, A. Bogliolo, and G. De Micheli, "A survey of design techniques for system-level dynamic power management," *IEEE Trans. VLSI Sys.*, vol. 8, no. 3, pp. 299-316, Jun. 2000.
- [25] T. D. Burd, T. A. Pering, A. J. Stratakos, and R. W. Brodersen, "A dynamic voltage scaled microprocessor system," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 11, pp. 1571-1580, Nov. 2000.
- [26] M. A. Haque, H. Aydin, and D. Zhu, "On reliability management of energy-aware real-time systems through task replication," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 813-825, Mar. 2017.
- [27] Y. Zhang and R. Chen, "A survey of energy-aware scheduling in mixed-criticality systems," *Journal of Systems Architecture*, vol. 1, no. 17, Article ID: 102524, Jun. 2022.
- [28] J. Chen and C. Kuo, "Energy-efficient scheduling for real-time systems on dynamic voltage scaling (dvs) platforms," in *Proc. Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, RTCSA'07*, pp. 28-38, Daegu, South Korea, 21-24 Aug. 2007.
- [29] A. Burns and R. I. Davis, *Mixed-Criticality Systems: A Review*, *Tech. Rep., Dept. Comput. Sci. Univ. York*, 61 pp. 1-61, 2016.
- [30] S. Narayana, P. Huang, G. Giannopoulou, L. Thiele, and R. V. Prasad, "Exploring energy saving for mixed-criticality systems on multi-cores," in *Proc. IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp., RTAS'16*, 12 pp., Vienna, Austria, 11-14 Apr. 2016.
- [31] P. Huang, P. Kumar, G. Giannopoulou, and L. Thiele, "Energy efficient DVFS scheduling for mixed-criticality systems," in *Proc. Int. Conf. Embedded Software, EMSOFT'14*, 10 pp., Uttar Pradesh, India, 12-17 Oct. 2014.

سید حسن صادق‌زاده تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد کامپیوتر به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۸ پایان رسانده است. ایشان دانشجوی دکتری رشته کامپیوتر و عضو آزمایشگاه سیستم‌های نهفته توزیع شده اتکاپذیر (DDEmS) دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. ایشان هم‌اکنون هیأت علمی دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه پیام نور می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های نهفته اتکاپذیر، تحمل پذیری اشکال، قابلیت اطمینان، زمان‌بندی و طراحی سیستم‌های کم‌توان.