

زمان بندی آگاه از انرژی مصرفی برای سیستم‌های بی‌درنگ تک‌پردازنده‌ای بحرانی - مختلط

سیدحسین صادقزاده و یاسر صداقت

کاهش هزینه، اندازه و وزن سیستم، وظایف متفاوت با درجه اهمیت مختلف به صورت یکپارچه روی یک سخت‌افزار قرار گرفته و سیستم‌های بحرانی- مختلط^۳ معرفی شده است [۴] تا [۹]. نیاز و تمایل صنعت به سیستم‌های نهفته بحرانی- مختلط (به ویژه صنعت هوافضا و خودروسازی [۴])، طراحی و پیاده‌سازی این سیستم‌ها را گسترش داده و استفاده از آنها در سال‌های اخیر به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است. در این سیستم‌ها، وظایف ایمنی- بحرانی^۴ غیر از طراح سیستم^۵، توسط متخصص تحمل‌پذیری اشکال (صادرکننده گواهی^۶) ارزیابی و اعتبارسنجی^۷ شده و گواهی مورد نیاز صادر می‌گردد. این در حالی است که وظایف ایمنی- غیر بحرانی تنها توسط طراح سیستم مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. بدترین زمان اجرای وظایف^۸ (WCET) ایمنی- بحرانی به صورت هم‌زمان توسط صادرکننده گواهی و طراح، محاسبه و ارزیابی می‌گردد. در حالی که زمان اجرا در وظایف ایمنی- غیر بحرانی تنها توسط طراح سیستم محاسبه می‌گردد. صادرکننده گواهی شرایط محافظه‌کارانه^۹ تری را برای ارزیابی بدترین زمان اجرا مد نظر قرار می‌دهد (از جمله در نظر گرفتن زمان اجرای فرایند بازیابی از خطا) و از روش‌های متفاوتی نسبت به طراح استفاده می‌کند [۱۰]. بر این اساس در اغلب موارد بدترین زمان اجرای وظایف ایمنی- بحرانی توسط صادرکننده گواهی از زمان اجرای محاسبه‌شده توسط طراح بیشتر است.

به عنوان نمونه‌ای بارز از سیستم‌های بحرانی- مختلط می‌توان به وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV) اشاره کرد که در این وسایل، وظایف به دو گروه ایمنی- بحرانی و ایمنی- غیر بحرانی تقسیم می‌شوند [۱۱]. در پرنده‌های UAV، وظایف ایمنی- بحرانی شامل کنترل پرواز و مسیریابی و وظایف ایمنی- غیر بحرانی شامل ردیابی شیء برای نظارت و گرفتن عکس می‌باشد. عدم انجام وظایف ایمنی- بحرانی در مقابل وظایف ایمنی- غیر بحرانی که قابل تحمل می‌باشند، فاجعه‌آور خواهد بود زیرا این سیستم‌ها بی‌درنگ^{۱۰} هستند و باید مهلت زمانی^{۱۱} خود را در هر شرایط محیطی رعایت کنند [۱۰]. همچنین میزان انرژی مصرفی^{۱۲} به دلیل قابل حمل بودن^{۱۳} این سیستم‌ها بسیار حایز اهمیت است [۱۲]. از این گذشته برای سیستم‌هایی که مشکل تأمین انرژی ندارند، افزایش توان و انرژی

چکیده: معماری پیمان‌های یکپارچه تحولی قابل توجه در صنعت هوافضا به وجود آورده است. در این معماری به دلیل کاهش اندازه، وزن، توان مصرفی و هزینه، وظایف با درجه بحرانی متفاوت بر روی یک سخت‌افزار تجمیع شده و از منابع به صورت مشترک استفاده می‌کنند. علاقه صنعت به این یکپارچه‌سازی، منجر به معرفی سیستم‌های بحرانی- مختلط شده است. یکی از نیازهای اساسی این سیستم‌ها، بی‌درنگی و اطمینان از اجرای به موقع وظایف بحرانی می‌باشد که البته تجمیع وظایف بحرانی و غیر بحرانی، زمان‌بندی اجرای وظایف را با مشکلاتی مواجه می‌کند. همچنین به دلیل استفاده از باتری در این وسایل، کاهش انرژی مصرفی از دیگر نیازهای مهم می‌باشد. بنابراین در این مقاله به منظور دستیابی به نیازهای مطرح‌شده (زمان‌بندی بی‌درنگ و کاهش انرژی مصرفی)، یک روش زمان‌بندی ابتکاری آگاه به انرژی مصرفی در این سیستم‌ها معرفی می‌شود. این الگوریتم ضمن تضمین اجرای به موقع وظایف بحرانی، انرژی مصرفی سیستم را با تغییر پویای ولتاژ و فرکانس (DVFS) کاهش خواهد داد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد انرژی مصرفی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مشابه تا ۱۴٪ بهبود می‌یابد.

کلیدواژه: تغییر پویای ولتاژ و فرکانس، زمان‌بندی آگاه از انرژی مصرفی، سیستم‌های بحرانی- مختلط، سیستم‌های بی‌درنگ، مصرف توان.

۱- مقدمه

تا قبل از دهه ۱۹۶۰ میلادی، سیستم‌های الکترونیکی کنترل پرواز (اویونیک^۱) بیشتر مبتنی بر قطعات و مدارهای آنالوگ بودند. این سیستم‌ها کارایی بالایی نداشته و اندازه، وزن و مصرف توان بالایی داشتند. اتصال در این سیستم‌ها با کابل بود که حجم زیادی را اشغال می‌کرد. با توسعه فناوری‌های دیجیتال، به مرور سیستم‌های آنالوگ با سیستم‌های دیجیتال جایگزین شدند و انتقال اطلاعات از طریق گذرگاه‌های داده دیجیتال امکان‌پذیر شد. در دهه ۱۹۸۰، معماری به هم وابسته دیجیتال (Federated) در طراحی تجهیزات اویونیک معرفی گردید. در این معماری متناظر با هر وظیفه، یک سیستم کامپیوتری برای پردازش اطلاعات قرار داده شده و قطعات به صورت توزیع‌شده در سطح هواپیما جانمایی گردیده که این ساختار، افزایش وزن و حجم سیستم‌های اویونیک را به دنبال دارد. در مقابل این معماری، در سال ۱۹۹۵ معماری پیمان‌های یکپارچه^۲ (IMA) معرفی گردیده [۱] تا [۳] که در این معماری، برای

این مقاله در تاریخ ۲۶ فروردین ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۲۸ مهر ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

سیدحسین صادقزاده، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، (email: sadeghzadeh.h@mail.um.ac.ir).

یاسر صداقت (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، (email: y_sedaghat@um.ac.ir).

1. Avionic
2. Integrated Modular Avionics

3. Mixed Criticality Systems

4. Safety-Critical

5. System Designer

6. Certificate Authority

7. Validate

8. Worst Case Execution Time

9. Conservative

10. Real-Time

11. Deadline

12. Energy Consumption

13. Portable

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

منبع	درجه بحرانی وظایف	راهکار ارائه‌شده برای کاهش انرژی مصرفی	معیار
[۱۶] و [۱۹] تا [۲۸]	یکسان	به دلیل وجود وظایف با درجه اهمیت یکسان، راهکار ارائه‌شده در این مطالعات برای سیستم‌های بحرانی - مختلط کارا نیست.	وجود وظایف با درجه اهمیت یکسان
[۲۹]	متفاوت	زمان بندی ایستا و استفاده از DVFS	عدم استفاده از زمان‌های بی‌کاری ایجادشده در حین اجرای وظایف
[۳۰]	متفاوت	حذف وظایف غیر بحرانی. در این مقاله مشخص شده که مصالحه‌ای بین حذف وظایف غیر بحرانی و کاهش مصرف انرژی وجود دارد.	عدم استفاده از زمان‌های بی‌کاری ایجادشده در حین اجرای وظایف
[۳۱]	متفاوت	حذف وظایف غیر بحرانی برای کاهش انرژی مصرفی و تضمین زمان اجرای وظایف بحرانی	عدم استفاده از زمان‌های بی‌کاری ایجادشده در حین اجرای وظایف

نیاز به دقت نظر بیشتری دارد. علاوه بر موارد مذکور، بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که اخیراً برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های نهفته بی‌درنگ بحرانی - مختلط نیز مطالعاتی انجام شده است [۲۹] تا [۳۱]. در یکی از این مطالعات، [۲۹]، راه حلی برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم تک‌پردازنده‌ای ارائه گردیده است. در این مقاله، فرکانس کاری هر وظیفه به صورت ایستا مشخص شده و وظایف بر اساس این فرکانس اجرا می‌شوند. اما می‌توان از زمان‌های بی‌کاری ایجادشده در حین اجرای وظایف برای کاهش بیشتر فرکانس کاری وظایف استفاده نمود. خلاصه‌ای از مطالب ذکرشده در این بخش در جدول ۱ آمده است.

بنابراین بر اساس مطالعات صورت‌گرفته در این مقاله سعی شده تا روشی برای بهبود انرژی مصرفی با کمک استفاده از زمان‌های بی‌کاری ایجادشده در حین اجرای وظایف ارائه شود.

با داشتن این هدف، یک روش زمان‌بندی برخط^۳ ارائه خواهد شد تا ضمن تضمین رعایت مهلت زمانی وظایف، از زمان بی‌کاری ایجادشده (که در حین اجرای وظایف ایجاد می‌شود) برای کاهش بیشتر فرکانس کاری و بهبود انرژی مصرفی استفاده شود. در این مقاله، منظور از وظایف بحرانی، وظایف ایمنی - بحرانی و منظور از وظایف غیر بحرانی، وظایف ایمنی - غیر بحرانی می‌باشد.

در ادامه این مقاله و در بخش ۲، مدل سیستم شرح داده شده و با ذکر مثالی به انگیزه تحقیق پرداخته خواهد شد. در بخش ۳ ضمن بیان راهکار پیشنهادی، زیرمسائل لازم برای حل مسأله اصلی بیان خواهد شد. در بخش ۴ نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی نشان داده شده و در بخش ۵ نتیجه‌گیری نهایی ارائه آمده است.

۲- مدل سیستم و انگیزه تحقیق

برای زمان‌بندی وظایف در سیستم‌های بحرانی - مختلط همراه با کاهش انرژی مصرفی، مدل وظیفه و انرژی مصرفی نیاز می‌باشد که در ادامه به این دو مدل پرداخته خواهد شد.

۲-۱ مدل وظیفه

یک مجموعه شامل n وظیفه دوره‌ای بی‌درنگ $T = [T_1, T_2, \dots, T_n]$ در نظر گرفته می‌شود. علت انتخاب این نوع مدل وظیفه این است که عموماً کاربردهای بی‌درنگ به طور ذاتی به صورت دوره‌ای می‌باشند و این مدل وظیفه شایع‌ترین مدل وظیفه در سیستم‌های بی‌درنگ است [۳۲]. درجه بحرانی هر وظیفه توسط l_i نمایش داده می‌شود به طوری که $l_i = high$ وظایف بحرانی و $l_i = low$ وظایف غیر بحرانی را نشان

مصرفی باعث تولید گرما شده و گرمای تولیدشده مخصوصاً در واحدهای پردازشی موجب تأخیر در مدارها [۱۳] و خرابی و کاهش قابلیت اطمینان^۱ قطعات سیستم می‌شود [۱۴]. بنابراین لازم است در کنار انجام به موقع وظایف، روش‌هایی برای کاهش انرژی مصرفی نیز مد نظر قرار گیرد.

تاکنون روش‌های مدیریت انرژی متعددی برای کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های بی‌درنگ ارائه گردیده که از مدیریت پویای توان (DPM) و روش‌های اعمال تنظیم پویای ولتاژ و فرکانس (DVFS) [۱۵] و [۱۶] استفاده می‌گردد. این روش‌ها از زمان بی‌کاری موجود در سیستم برای کاهش مصرف انرژی استفاده می‌کنند. با استفاده از روش DPM، بخشی از سیستم که به صورت موقت مورد نیاز نیست به حالت غیر فعال برده و یا خاموش می‌شود. اما هنگامی که زمان بی‌کاری وجود داشته باشد (زمان بیشتری نسبت به زمان مورد نیاز برای انجام کار فعلی در اختیار باشد)، با بهره‌گیری از روش DVFS، ولتاژ تغذیه (و فرکانس کاری) واحد مورد نظر را کاهش می‌دهند تا مصرف انرژی و توان پویای سیستم کاهش یابد. اما این روش‌ها به دلیل افزایش زمان اجرای وظیفه می‌توانند در سیستم‌های بی‌درنگ منجر به نقض مهلت‌های زمانی شده و سبب بروز فاجعه شوند. بنابراین بین روش‌هایی که برای کاهش مصرف انرژی و فراهم کردن بی‌درنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تضاد قابل توجهی وجود دارد [۱۵] و لذا دستیابی به زمان‌بندی مناسب با انرژی مصرفی کم در این سیستم‌ها، امری ضروری می‌باشد.

در پژوهش‌های اولیه‌ای که در زمینه کاهش انرژی مصرفی صورت گرفته است محققان از تمام زمان بی‌کاری برای کاهش انرژی مصرفی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال در [۱۷] انرژی مصرفی کمینه شده است اما به دلیل اثرات منفی DVFS بر روی قابلیت اطمینان، استفاده از این روش برای سیستم‌های بی‌درنگی که در کاربردهای بحرانی - ایمن به کار گرفته می‌شوند نمی‌تواند مناسب باشد. روش ارائه‌شده در [۱۸] اگرچه کاهش ولتاژ و فرکانس، انرژی را تا ۶۳ درصد کاهش می‌دهد، ولی احتمال بروز اشکال^۲ را تا ۲۰۰ برابر افزایش می‌دهد. همچنین مطالعات ارائه‌شده در [۱۶] و [۱۹] تا [۲۸] روش‌هایی را برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های بی‌درنگ معرفی کرده‌اند. در این مطالعات، وظایف سیستم دارای اهمیت یکسان می‌باشند. اما همان طور 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. بنابراین مطالعات [۱۶] و [۱۹] تا [۲۸] برای سیستم‌های بحرانی - مختلط کارا نبوده و مباحث مطرح، به ویژه بی‌درنگی و مدیریت انرژی مصرفی

1. Reliability

2. Fault

در فرکانس f که از مقادیر $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ انتخاب می‌شود یک پردازنده حداکثر c_i/f واحد زمان نیاز دارد تا وظیفه T_i را اجرا کند. شکل ۱ چگونگی عملکرد DVFS را نشان می‌دهد. در شکل ۱-الف زمان اجرای وظیفه، ۳ واحد زمانی و موعده مقرر آن ۱۰ می‌باشد. بنابراین فاصله زمانی ۳ تا ۱۰ (۷ واحد زمانی) زمان بی‌کاری پردازنده است که از این زمان می‌توان به منظور کاهش انرژی مصرفی استفاده نمود. بنابراین اعمال DVFS و کاهش فرکانس پردازنده به $0.3f_{max}$ ، منجر به کاهش انرژی مصرفی سیستم خواهد شد. شکل ۱-ب اجرای وظیفه با فرکانس $0.3f_{max}$ را نشان می‌دهد.

انرژی مصرفی یک سیستم مبتنی بر میزان توان مصرفی سیستم محاسبه می‌گردد. توان مصرفی یک سیستم در حالت فعال از دو بخش توان مصرفی ایستا^۳ و توان مصرفی پویا^۴ تشکیل شده است. توان ایستا (P_s) غالباً به دلیل جریان نشی در سیستم است [۱۶]، [۳۵] و [۳۶].

توان پویا (P_d) شامل توان پویای وابسته به فرکانس و توان پویای مستقل از فرکانس می‌شود [۳۶]. در نتیجه رابطه توان در وضعیت فعال مشابه آنچه در [۳۶] آمده است به صورت (۱) خواهد بود

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

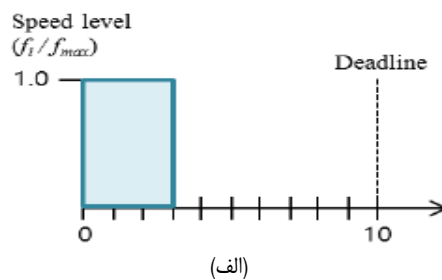
که در آن P_{ind} توان پویای مستقل از فرکانس است که مشخص‌کننده توانی است که به وسیله اجزای خارج تراشه مثل حافظه اصلی و اجزای خارجی مصرف می‌شود. P_{dep} توان پویای وابسته به فرکانس است که مشخص‌کننده توان اجزایی از سیستم است که توان مصرفی آنها وابسته به فرکانس می‌باشد. f فرکانس پردازشی، C_{ef} بار خازنی سوئیچینگ مؤثر و ولتاژ تغذیه می‌باشد. P_{ind} و C_{ef} البته ممکن است از یک وظیفه به وظیفه دیگر تفاوت داشته باشد اما در این مقاله، همانند مقالات دیگر (نظیر [۳۵] و [۳۶]) برای سهولت فرض می‌شود که برای تمامی وظایف یکسان است. از آنجا که برای کاهش انرژی مصرفی علاوه بر فرکانس، ولتاژ تغذیه نیز می‌بایست 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 نشان‌دهنده رابطه خطی فرکانس و ولتاژ است [۳۵] و [۳۶]) به صورت (۲) بازنویسی می‌شود

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

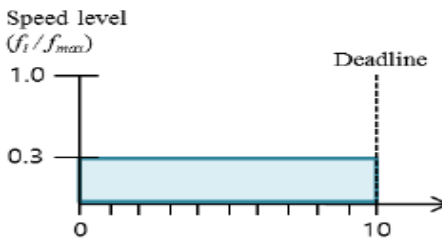
که ضریب a ($2 \leq a \leq 3$) از ضرایب ثابت وابسته به سیستم است و به عبارت دیگر a رابطه تقریباً خطی ولتاژ و فرکانس را مدل می‌کند. با توجه به این که انرژی، انتگرال توان در زمان می‌باشد، انرژی مصرفی یک وظیفه در فرکانس z به صورت (۳) است

$$E(z) = P(z) \times t(z) = p(z) \times \frac{C_i}{z} \quad (3)$$

از این رابطه مشخص می‌شود که فرکانس‌های پایین‌تر منجر به کم‌تر شدن مصرف انرژی در بخش وابسته به فرکانس می‌شود. اما با کم‌شدن فرکانس، زمان اجرای وظایف طولانی‌تر شده و در نتیجه انرژی ایستا و انرژی مستقل از فرکانس بیشتری مصرف می‌شود. بنابراین می‌بایست یک فرکانس انرژی کارآمد وجود داشته باشد. انرژی ایستا تنها زمانی می‌تواند کاملاً از بین برود که کل سیستم خاموش شود اما به دلیل سربار زمانی



(الف)



(ب)

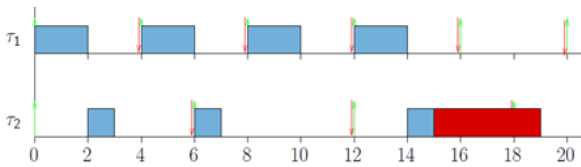
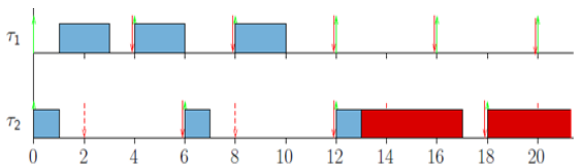
شکل ۱: DVFS برای وظایف بی‌درنگ، (الف) اجرای وظیفه با بیشترین فرکانس و (ب) اجرای وظیفه با فرکانس $0.3f_{max}$.

می‌دهد. وظایف بحرانی با دو زمان اجرای c_i^{high} و c_i^{low} مشخص شده 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 سیستم‌های بحرانی-مختلط مانند سیستم‌های سنتی موعده مقرر ضمنی 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 موعده مقرر است) و l_i درجه بحرانی هر وظیفه می‌باشد. بهره‌وری وظیفه T_i به صورت $u_i = c_i / p_i$ تعریف می‌شود که 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. همچنین j امین نمونه وظیفه (کار) از وظیفه T_i که T_{ij} نامیده می‌شود، در زمان $(j-1) \times p_i$ منتشر می‌شود و می‌بایست تا مهلت زمانی آن در $(j \times p_i)$ به طور کامل اجرا شود [۳۳].

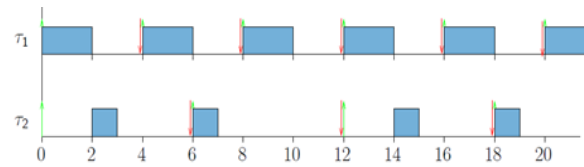
برای سیستم دو وضعیت مختلف در نظر گرفته می‌شود که $M_{sys} = low$ بیانگر وضعیت سیستم در حالت غیر بحرانی و $M_{sys} = high$ بیانگر وضعیت سیستم در حالت بحرانی می‌باشد. ابتدا سیستم در $M_{sys} = low$ شروع به کار کرده و چنانچه یکی از وظایف بحرانی به زمانی بیشتر از c_i^{low} نیاز داشته باشد، سیستم وضعیت عملیاتی خود را تغییر داده و $M_{sys} = high$ می‌شود. در این حالت وظایف غیر بحرانی برای تضمین اجرای وظایف بحرانی حذف خواهند شد [۴] تا [۶].

۲-۲ مدل انرژی مصرفی و DVFS

وظایف بر روی یک پردازنده که قابلیت DVFS دارد اجرا می‌شوند. پردازنده دارای l سطح فرکانس $f_{min} = f_1 < f_2 < \dots < f_l = f_{max}$ می‌باشد. برای سادگی سطوح فرکانس نسبت به حداکثر فرکانس (f_{max}) نرمالیزه می‌شود، یعنی $f_{max} = f_l = 1$. لازم به ذکر است که در پردازنده‌های امروزی l معمولاً یک رقم کوچک است و بیشتر از ۱۰ نیست [۳۴].

شکل ۱: تغییر وضعیت سیستم و عدم انجام به موقع وظیفه T_2 قبل از مهلت زمانی.

شکل ۲: زمان بندی وظایف بر اساس الگوریتم زمان بندی EDF-VD.



شکل ۳: زمان بندی وظایف بر اساس الگوریتم زمان بندی EDF.

جدول ۲: مثالی از مجموعه وظایف با درجه بحرانی متفاوت.

T_i	c_i^{low}	c_i^{high}	P_i	l_i
T_1	۲	۲	۴	low
T_2	۱	۵	۶	high

بیش از حد روشن و خاموش کردن سیستم، فرض می‌شود که توان ایستا همواره مصرف می‌شود. از این رو مصرف کل انرژی وظیفه T_i هنگامی که در فرکانس z اجرا می‌شود می‌تواند به صورت (۴) درآید

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

۳-۲ زمان بندی در سیستم‌های بحرانی - مختلط

همان طور که در بخش ۲-۱ گفته شد، سیستم‌های بحرانی - مختلط دارای وظایف با درجه بحرانی متفاوت می‌باشند. بر طبق ادعای مطرح شده در [۹] وجود وظایف با درجه بحرانی متفاوت باعث می‌شود روش‌های رایج زمان بندی مانند EDF^۱ [۳۷] کارا نباشند. بنابراین به الگوریتمی نیاز است که ضمن اجرای به موقع وظایف، شرایط لازم برای اجرای وظایف بحرانی در صورتی که نیاز به زمان بیشتری نسبت به c_i^{low} داشته باشند فراهم گردد. بنابراین الگوریتم EDF-VD^۲ با هدف ایجاد موعد مقرر مجازی (VD)^۳ جهت تضمین اجرای به موقع وظایف بحرانی ارائه شده است [۶]. در این الگوریتم، پارامتر X به کمک بهره‌وری^۴ سیستم و طبق (۵) محاسبه شده و با ضرب این مقدار در موعد مقرر وظایف بحرانی، یک موعد مقرر مجازی در نظر گرفته می‌شود. سپس طبق الگوریتم EDF، وظایف زمان بندی می‌شوند. در این الگوریتم چنانچه وظایف بحرانی نیاز به زمان بیشتری نسبت به c_i^{low} داشته باشند، وظایف غیر بحرانی جهت تضمین رفتار به موقع وظایف بحرانی، قربانی می‌شوند. اگر U_i^t نشان دهنده مجموع بهره‌وری وظایف با c_i^t در $l_i = l_i$ باشد، آن گاه مقدار X طبق (۵) محاسبه می‌شود

$$X \geq \frac{U_{high}^{low}}{1 - U_{low}^{low}} \quad (5)$$

مقدار به دست آمده از (۵) در صورتی برای زمان بندی مناسب می‌باشد که

$$X \times U_{low}^{low} + U_{high}^{high} \leq 1 \quad (6)$$

بنابراین طبق (۵) و (۶) محدوده مناسب برای پارامتر X برابر است با

$$\frac{U_{high}^{low}}{1 - U_{low}^{low}} \leq X \leq \frac{1 - U_{high}^{high}}{U_{low}^{low}} \quad (7)$$

جزئیات بیشتر در [۶] آمده است.

این زمان بندی با ذکر مثالی بیشتر توضیح داده می‌شود. مجموعه

وظایف جدول ۲ را در نظر بگیرید. زمان بندی وظایف طبق الگوریتم EDF و شرایطی که سیستم در $M_{sys} = low$ می‌باشد در شکل ۱ نشان داده شده است. چنانچه وظیفه T_2 در لحظه ۱۵ نیاز به زمان بیشتری نسبت به c_i^{low} داشته باشد، سیستم تغییر وضعیت داده و طبق آنچه در زمان بندی شکل ۲ آمده است، وظیفه T_2 نمی‌تواند قبل از موعد مقرر (لحظه ۱۸) کار خود را به اتمام برساند.

بنابراین طبق آنچه گفته شد، برای زمان بندی وظایف با درجه بحرانی متفاوت از الگوریتم EDF-VD استفاده می‌شود. به منظور ایجاد موعد مقرر مجازی برای وظیفه بحرانی، محدوده مناسب برای X طبق (۵) و (۶) به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$X = \frac{U_{high}^{low}}{1 - U_{low}^{low}} = \frac{\frac{1}{6}}{1 - \frac{1}{3}} = \frac{1}{3} = 0.33$$

$$X \times U_{low}^{low} + U_{high}^{high} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} + \frac{5}{6} = 1$$

با توجه به مقادیر محاسبه شده از (۵) و (۶) و طبق (۷)، محدوده مناسب برای پارامتر X عددی بین ۰.۳ و ۱ می‌باشد. بنابراین با انتخاب $X = 0.33$ ، موعد مقرر مجازی وظیفه T_2 به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$p'_2 = X \times p_2$$

و

$$p'_2 = \frac{1}{3} \times 6$$

بنابراین زمان بندی وظایف بر اساس الگوریتم EDF-VD به صورت شکل ۲ می‌باشد.

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، وظیفه T_2 در لحظه ۱۳ به زمان بیشتری نسبت به c_i^{low} نیاز دارد و بنابراین سیستم تغییر وضعیت داده و با حذف وظیفه T_1 ، وظیفه T_2 قبل از موعد مقرر به درستی زمان بندی می‌شود.

۴-۲ انگیزه تحقیق

با توجه به معرفی مدل سیستم در بخش ۲، مشخص شد که وجود وظایف با درجه بحرانی مختلف، زمان بندی را با مشکلاتی مواجه می‌کند. بنابراین برای حل این مشکل، الگوریتم EDF-VD معرفی و در بخش ۳-۲ به جزئیات آن اشاره شده است. اما از آنجا که این سیستم‌ها عموماً مبتنی بر باتری هستند، کاهش مصرف انرژی نیز یک نیاز ضروری است. لذا طبق آنچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، پردازنده در زمان‌هایی بی‌کار

1. Early Deadline First
2. EDF with Virtual Deadlines
3. Virtual Deadlines
4. Utilization

در این حالت وظایف غیر بحرانی برای تضمین اجرای وظایف بحرانی حذف خواهند شد.

- فرکانس کاری وظیفه: (f_i) بیانگر فرکانسی می‌باشد که برای هر وظیفه در وضعیت‌های مختلف سیستم در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در حالت $M_{sys} = low$ یک فرکانس کاری برای وظایف غیر بحرانی (f_{low}^{low}) و یک فرکانس کاری برای وظایف بحرانی (f_{low}^{high}) در نظر گرفته می‌شود. در حالت $M_{sys} = high$ که وظایف غیر بحرانی حذف شده‌اند، فقط یک فرکانس کاری برای وظایف بحرانی (f_{high}^{high}) در نظر گرفته می‌شود.

- انرژی سیستم (E_{sys}): بیانگر توان مصرفی در زمان سپری شده (زمان اجرای وظیفه) است و انرژی مصرفی یک وظیفه به صورت (۹) می‌باشد

$$E_{sys} = E_{lo} + E_{hi} \quad (9)$$

که E_{lo} نشان‌دهنده انرژی مصرفی در $M_{sys} = low$ بوده و از (۱۰) محاسبه می‌شود

$$E_{lo} = \sum_{T_i \in T_{lo}} \frac{C_i^{low}}{f_i^{low}} (P_{Active}) \quad (10)$$

و E_{hi} نشان‌دهنده انرژی مصرفی در $M_{sys} = high$ بوده و از (۱۱) محاسبه می‌شود

$$E_{hi} = \sum_{T_i \in T_{hi}} \frac{C_i^{high}}{f_i^{high}} (P_{Active}) \quad (11)$$

بنابراین بعد از زمان بندی وظایف برای یک ابردوره^۲، مقدار انرژی مصرفی (در یک ابردوره) محاسبه می‌شود. یک ابردوره با کوچک‌ترین مضرب مشترک دوره همه وظایف برابر است.

۳-۲ فازهای لازم برای حل مسأله اصلی

برای حل مسأله کاهش مصرف انرژی و تضمین اجرای به موقع وظایف در سیستم‌های بحرانی- مختلط بعد از بازنمایی مسأله حل فازهای زیر ضروری است:

- محاسبه فاکتور X برای تولید موعد مقرر مجازی (VD) برای وظایف بحرانی.
- محاسبه فرکانس کاری برای وظایف غیر بحرانی در $M_{sys} = low$ با توجه به مهلت زمانی وظایف.
- محاسبه فرکانس کاری برای وظایف بحرانی در $M_{sys} = low$ و برای همین وظایف در $M_{sys} = high$ با توجه به مهلت زمانی وظایف.

۳-۲-۱ محاسبه فاکتور X

برای محاسبه فاکتور X باید در نظر داشت که استفاده از DVFS منجر به افزایش زمان اجرای وظایف می‌شود و بنابراین محاسبه مجدد مقدار X (X') بعد از اعمال روش DVFS ضروری است. اگر U' بهره‌وری وظایف بعد از اعمال روش DVFS باشد ($U' = c_i / (p_i \times f_i)$)، X' از (۱۲) محاسبه می‌شود

$$X' \geq \frac{U_{high}^{low}}{1 - U_{low}^{low}} \quad (12)$$

می‌باشد (مثلاً بین لحظه ۳ تا ۴ و ۷ تا ۸) که می‌توان با استفاده از روش DVFS و کاهش فرکانس پردازنده، از این زمان‌ها برای کاهش انرژی مصرفی استفاده نمود. بنابراین با توجه به اهمیت کاهش انرژی مصرفی در این سیستم‌ها، ارائه یک الگوریتم زمان بندی بی‌درنگ به همراه کاهش انرژی مصرفی ضروری می‌باشد. در [۲۹] یک راه حل برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم تک‌پردازنده‌ای ارائه شده است. در این مقاله فرکانس کاری هر وظیفه به صورت ایستا مشخص و وظایف بر اساس فرکانس تعیین شده اجرا می‌شوند. اما هدف اصلی راهکار پیشنهادی، ارائه یک الگوریتم پویا و استفاده از زمان رزرو شده برای وظایف بحرانی ($t = c_i^{high} - c_i^{low}$) برای کاهش بیشتر فرکانس و بهبود انرژی مصرفی می‌باشد. 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 خواهد شد.

۳- راهکار پیشنهادی

با توجه به پارامترهای سیستم که در بخش ۳-۱ به آنها اشاره خواهد شد با تغییر پویای ولتاژ، وظایف طوری زمان بندی خواهند شد که محدودیت‌های آنها نیز ارضا شده (به عنوان مثال قبل از زمان مقرر وظیفه اجرای آن پایان یابد) و انرژی مصرفی سیستم کاهش یابد. بنابراین بر اساس مدل معرفی شده در بخش ۲-۱، ابتدا سیستم در $M_{sys} = low$ و حالتی که وظایف نیازمند زمانی به اندازه c_i^{low} هستند، شروع به کار می‌کند. سپس با توجه به زمان بی‌کاری، فرکانس کاری پردازنده برای کاهش انرژی مصرفی سیستم کاهش می‌یابد. چنانچه وظیفه بحرانی نیازمند زمان اجرای بیشتری نسبت به c_i^{low} باشد، سیستم تغییر شرایط داده ($M_{sys} = high$) و با حذف وظایف غیر بحرانی، وظایف بحرانی اجرا خواهند شد. بنابراین راهکار پیشنهادی و بیان مسأله کاهش انرژی مصرفی و اجرای به موقع وظایف، در ابتدا نیازمند بازنمایی^۱ مسأله و سپس حل زیرمسائل مختلف می‌باشد که در ادامه معرفی خواهند شد.

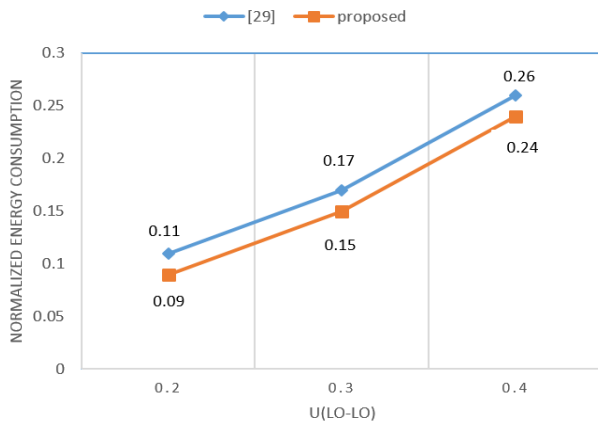
۳-۱ بازنمایی مسأله

به منظور کاهش مصرف انرژی و تضمین اجرای به موقع وظایف در سیستم‌های بحرانی- مختلط، ابتدا باید بازنمایی از مسأله به همراه عامل‌های اصلی داشت. این بازنمایش باید به گونه‌ای باشد که بتوان پارامترهای دخیل در مسأله را بیان و کاهش انرژی مصرفی و تضمین زمان اجرای وظایف را به عنوان تابعی از این پارامترها تعریف کرد. بنابراین مسأله در قالب چهارتایی زیر بیان می‌شود

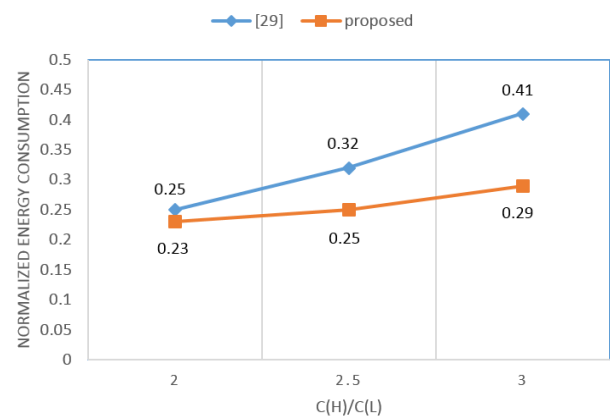
$$Problem(T_s, M_{sys}, f_i, E_{sys}) \quad (8)$$

که پارامترهای مختلف آن عبارتند از:

- مدل وظیفه (T_s): نشان‌دهنده وظایفی است که اجرا خواهند شد. این مدل در بخش ۲-۱ به طور کامل توضیح داده شده است.
- وضعیت سیستم (M_{sys}): بیانگر وضعیت سیستم است. برای سیستم بحرانی- مختلط با دو وضعیت کاری مختلف، $M_{sys} = low$ وضعیت سیستم در حالت غیر بحرانی و $M_{sys} = high$ وضعیت سیستم در حالت بحرانی می‌باشد. ابتدا سیستم در $M_{sys} = low$ شروع به کار کرده و چنانچه وظیفه بحرانی به زمانی بیشتر از c_i^{low} نیاز داشته باشد سیستم وضعیت خود را تغییر داده و $M_{sys} = high$ می‌شود.



شکل ۶: انرژی مصرفی بر اساس بهره‌وری وظایف غیر بحرانی.



شکل ۵: انرژی مصرفی بر اساس زمان رزرو سیستم.

۳-۲-۲ محاسبه فرکانس

همان طور که در بازنمایی مسأله اشاره شد، انرژی سیستم وابسته به فرکانس و زمان اجرای وظیفه می‌باشد. در زمان بندی وظایف، برای وظایف بحرانی زمان رزرو به میزان $(t = c_i^{high} - c_i^{low})$ در نظر گرفته می‌شود که در صورت اجرای این وظایف در c_i^{low} ، این زمان رزرو $(t = c_i^{high} - c_i^{low})$ به زمان بی‌کاری سیستم افزوده می‌شود. این زمان می‌تواند برای کاهش بیشتر فرکانس وظایف استفاده شود که طبق (۹)، با کاهش فرکانس، انرژی مصرفی سیستم کاهش چشم‌گیری خواهد داشت. در الگوریتم پیشنهادی در صورت اتمام وظیفه بحرانی در c_i^{low} و برای استفاده از زمان رزرو، فرکانس جدید پردازنده (f_i') طبق (۱۳) محاسبه می‌شود

$$f_i' = \max\{f_{ee}, f_i \times U_i\} \quad (13)$$

که U_i بهره‌وری به‌روز شده وظایف در صورت اتمام وظایف بحرانی در c_i^{low} بوده و f_{ee} فرکانس بحرانی یا فرکانس انرژی کارآمد می‌باشد و مشابه با روابط ارائه شده در [۳۸] و [۳۹] به دست می‌آید یعنی

$$f_{ee} = \sqrt{\frac{P_{ind}}{(a-1) \times C_{ef}}} \quad (14)$$

۴- ارزیابی راهکار پیشنهادی

روش ارائه شده مشابه [۲۹] و [۴۰]، با شبیه‌سازی بر روی وظایفی که به صورت تصادفی تولید شده، ارزیابی گردیده است. ویژگی وظایفی که به صورت تصادفی تولید می‌شوند مشابه [۲۹] می‌باشد که از روش‌های معروف تولید وظایف در سیستم‌های بحرانبند مختلط هستند [۴۰]. 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 و 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 $c_i^{high} = \mu \times c_i^{low}$ تعریف می‌شود که μ (زمان 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 محاسبه می‌گردد. سپس روش پیشنهادی با روش ارائه شده در [۲۹] در حالات زیر و مشابه پارامترهایی که در [۴۱] بیان شده است مقایسه خواهد شد:

- مقدار انرژی مصرفی بر اساس زمان رزرو سیستم (پارامتر μ)
- مقدار انرژی مصرفی بر اساس بهره‌وری وظایف غیر بحرانی

- مقدار انرژی مصرفی بر اساس بهره‌وری وظایف بحرانی
- مقدار انرژی مصرفی بر اساس تعداد وظایف

۴-۱ مقدار انرژی مصرفی بر اساس زمان رزرو سیستم (پارامتر μ)

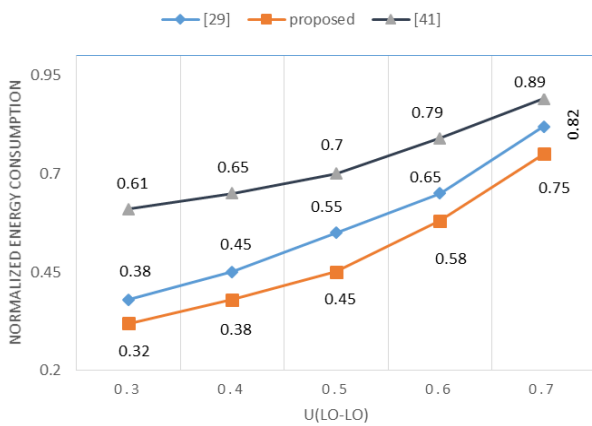
شکل ۵ انرژی مصرفی برای مقادیر مختلف μ (۱/۵ تا ۲/۵) با فرض $U_{low}^{low} = 0.3$ و $U_{high}^{low} = 0.2$ را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان رزرو که منجر به افزایش بار کاری سیستم خواهد شد، انرژی مصرفی در هر دو حالت افزایش می‌یابد. علت این امر، کاهش زمان بی‌کاری به دلیل افزایش بار کاری سیستم می‌باشد. لازم به ذکر 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 پیشنهادی نسبت به روش قبل کمتر می‌شود. علت آن است که در روش پیشنهادی می‌توان از زمان‌های رزروی که برای وظایف بحرانی در نظر گرفته شده است، برای کاهش فرکانس سایر وظایف استفاده کرد که منجر به کاهش انرژی مصرفی خواهد شد.

۴-۲ مقدار انرژی مصرفی بر اساس بهره‌وری وظایف غیر بحرانی

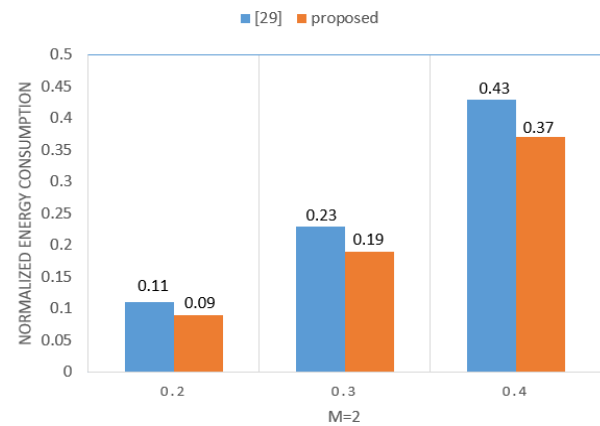
شکل ۶ انرژی مصرفی را بر اساس بهره‌وری وظایف غیر بحرانی در شرایطی که $U_{high}^{low} = 0.3$ و U_{low}^{low} از ۰.۲ تا ۰.۴ متغیر است نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش U_{low}^{low} که منجر به افزایش بار کاری سیستم می‌شود، انرژی مصرفی در هر دو حالت افزایش می‌یابد. البته اختلاف این تغییرات به ازای مقادیر مختلف U_{low}^{low} یکسان است. علت این امر، در نظر گرفتن زمان رزرو یکسان به دلیل ثابت بودن U_{high}^{low} می‌باشد. بنابراین افزایش بهره‌وری وظایف غیر بحرانی، انرژی مصرفی هر دو روش را افزایش داده، اما به دلیل ثابت بودن بهره‌وری وظایف بحرانی، تأثیر چندانی بر کاهش انرژی مصرفی روش پیشنهادی ندارد.

۴-۳ مقدار انرژی مصرفی بر اساس بهره‌وری وظایف بحرانی

شکل ۷ انرژی مصرفی را بر اساس بهره‌وری وظایف بحرانی در شرایطی که $\mu = 2$ ، $U_{low}^{low} = 0.2$ و U_{high}^{low} از ۰.۲ تا ۰.۴ متغیر می‌باشد نشان می‌دهد. با افزایش بهره‌وری وظایف بحرانی، زمان رزرو این وظایف بیشتر می‌شود و بنابراین وقتی زمان رزرو بیشتر باشد روش پیشنهادی بهتر عمل می‌کند. علت این است که روش ارائه شده در مقایسه با [۲۹]،



شکل ۹: مقایسه انرژی مصرفی روش پیشنهادی با [۲۹] و [۴۱].



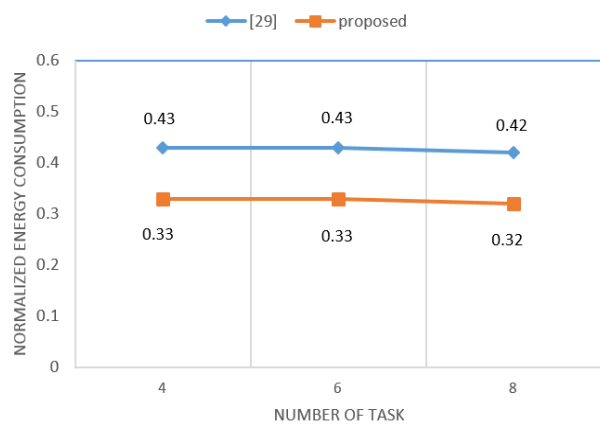
شکل ۷: انرژی مصرفی بر اساس بهره‌وری وظایف بحرانی.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی سیستم‌هایی بحرانی - مختلط و با اشاره بر این مطلب که اجرای به موقع وظایف و کاهش انرژی مصرفی، تأثیر بسزایی در عملکرد این سیستم‌ها دارد، به ارائه یک الگوریتم زمان‌بندی آگاه از انرژی مصرفی در این سیستم‌ها پرداخته شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی ضمن اجرای به موقع وظایف، انرژی مصرفی سیستم را به طور متوسط ۱۴٪ در مقایسه با روش‌های مشابه کاهش داده است. البته ذکر این مورد ضروری است که روش‌های کاهش مصرف انرژی به طور مستقیم بر روی میزان آسیب‌پذیری سیستم در برابر اشکال تأثیر منفی می‌گذارند و بروز اشکال می‌تواند منجر به رفتار خطا و خرابی شود. بنابراین به عنوان کارهای آینده می‌توان راهکارهایی را معرفی کرد که ضمن کاهش انرژی مصرفی، سیستم را در مقابل اشکال نیز تحمل‌پذیر نماید. اما روش‌های تحمل‌پذیر اشکال به دلیل استفاده از افزونگی، ممکن است باعث افزایش قابل ملاحظه مصرف انرژی شود. در نتیجه، لازم است در کنار کاهش مصرف انرژی، روش‌هایی به منظور ایجاد مصالحه برای تحمل‌پذیری اشکال سیستم نیز مد نظر قرار گیرد. همچنین پردازنده‌های چندهسته‌ای به دلیل افزایش کارایی و قدرت محاسباتی بالا، به طور گسترده در سیستم‌های نهفته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این پردازنده‌ها قابلیت تجمیع کاربردهای متفاوت بر روی یک سخت‌افزار را فراهم کرده و می‌توانند انتخاب مناسبی برای سیستم‌های نهفته با بحرانیّت مختلط باشند. بنابراین می‌توان راهکار معرفی شده را در پردازنده‌های چندهسته‌ای نیز تعمیم داد.

مراجع

- [1] C. B. Watkins and R. Walter, "Transitioning from federated avionics architectures to integrated modular avionics," in *Proc. IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conf., DASC'07*, 10 pp., Dallas, TX, USA, 21-25 Oct. 2007.
- [2] R. Ramaker, W. Krug, and W. Phebus, "Application of a civil integrated modular architecture to military transport aircraft," in *Proc. IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conf., DASC'07*, 10 pp., Dallas, TX, USA, 21-25 Oct. 2007.
- [3] J. Chen, C. Du, and P. Han, "Scheduling independent partitions in integrated modular avionics systems," *PloS one* 11, 2016.
- [4] S. K. Baruah, V. Bonifaci, G. D. Angelo, H. Li, A. Marchetti-spaccamela, N. Megow, and L. Stougie, "Scheduling real-time mixed-criticality jobs," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 61, no. 8, pp. 1140-1152, Aug. 2012.
- [5] F. Santy, L. George, P. Thierry, and J. Goossens, "Relaxing mixed-criticality scheduling strictness for task sets scheduled with FP," *Proc. 24th Euromicro Conf. on Real-Time Systems Real-Time Systems, ECRTS'12*, pp. 155-165, Pisa, Italy, 11-13 Jul. 2012.



شکل ۸: انرژی مصرفی بر اساس تعداد وظایف.

استفاده از زمان‌های رزرو، فرکانس کاری پردازنده را برای اجرای سایر وظایف کاهش می‌دهد که منجر به بهبود انرژی مصرفی می‌شود.

۴- مقدار انرژی مصرفی بر اساس تعداد وظایف

شکل ۸ انرژی مصرفی را بر اساس تعداد وظایف در شرایطی که $U_{low}^{high} = 0.3$ و $U_{low}^{low} = 0.4$ است نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود انرژی مصرفی به مقدار اندک بهبود یافته و افزایش وظایف به دلیل ثابت بودن بهره‌وری آنها، تأثیر چندانی بر انرژی مصرفی ندارد.

۴-۵ مقایسه با روش ارائه‌شده در [۴۱]

در بخش‌های قبلی، روش پیشنهادی با الگوریتم ارائه‌شده در [۲۹] مقایسه شده است. هر دو روش راهکاری را برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم تک‌پردازنده‌ای (بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم) ارائه داده‌اند اما در [۴۱] در کنار کاهش انرژی مصرفی، قابلیت اطمینان سیستم هم مد نظر قرار گرفته است. شکل ۹ انرژی مصرفی را در شرایطی که $U_{low}^{high} = 0.3$ و $U_{low}^{low} = 0.8$ تا 0.3 متغیر است نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، انرژی مصرفی روش پیشنهادی و [۲۹] در مقایسه با [۴۱] کمتر می‌باشد و علت آن است که در روش پیشنهادی و [۲۹]، از تمام زمان‌های رزرو برای کاهش فرکانس وظایف استفاده می‌شود که منجر به کاهش انرژی مصرفی خواهد شد. این در حالی است که در [۴۱]، مقداری از زمان‌های بی‌کاری برای قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته شده و از زمان بی‌کاری باقیمانده برای کاهش فرکانس وظایف استفاده می‌شود. بنابراین نتایج نشان می‌دهند روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ارائه‌شده در [۴۱] انرژی مصرفی را بهبود می‌بخشد.

- [26] R. Davis and A. Wellings, "Dual priority scheduling," in *Proc. 16th IEEE Real-Time Systems Symp.*, pp. 100-109, Pisa, Italy, 5-7 Dec. 1995.
- [27] P. Pillai and K. G. Shin, "Real-time dynamic voltage scaling for low-power embedded operating systems," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 35, no. 5, pp. 89-102, Dec. 2001.
- [28] X. Qi, D. Zhu, and H. Aydin, "Global scheduling based reliability-aware power management for multiprocessor real-time systems," *Real-Time Systems*, vol. 47, no. 2, pp. 109-142, Mar. 2011.
- [29] P. Huang, P. Kumar, G. Giannopoulou, and L. Thiele, "Energy efficient dvfs scheduling for mixed-criticality systems," in *Proc. of the 14th Int. Conf. on Embedded Software*, pp. 11-23, Jaypee Greens, India, 12-17 Oct. 2014.
- [30] V. Legout, J. Mathieu, and P. Laurent, "Mixed-criticality multiprocessor real-time systems: energy consumption vs deadline misses," in *Proc. 1st Workshop on Real-Time Mixed Criticality Systems, ReTiMiCS'13*, 6 pp., Taipei, Taiwan, Aug. 2013.
- [31] M. Volp, M. Hahnel, and A. Lackorzynski, "Has energy surpassed timeliness? scheduling energy-constrained mixed-criticality systems," *Proc. IEEE 20th Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp. RTAS'14*, pp. 275-284, Berlin, Germany, 15-17 Apr. 2014.
- [32] H. Kopetz, "Real-time systems: design principles for distributed embedded applications," Springer Science & Business Media, 2011.
- [33] A. Burns and R. I. Davis, *Mixed-Criticality Systems-A Review*, Dep. Comput. Sci. Univ. York, Tech. Rep. pp. 1-61, 2016.
- [34] B. Zhao, A. Hakan, and D. Zhu, "Enhanced reliability-aware power management through shared recovery technique," in *Proc. of the Int. Conf. on Computer-Aided Design*, pp. 63-70, New York, NY, USA, 2-5 Nov. 2009.
- [35] M. A. Haque, H. Aydin, and D. Zhu, "On reliability management of energy-aware real-time systems through task replication," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 813-825, Mar. 2017.
- [36] V. Moghaddas, M. Fazeli, and A. Patooghy, "Reliability-oriented scheduling for static-priority real-time tasks in standby-sparing systems," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 45, no. 1, pp. 208-215, Aug. 2016.
- [37] 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.
- [38] S. Pagani and J. J. Chen, "Energy efficient task partitioning based on the single frequency approximation scheme," in *Proc. IEEE 34th Real-Time Systems Symp. RTSS'13*, Vancouver, BC, Canada, 3-6 Dec. 2013.
- [39] L. Niu, "System-level energy-efficient scheduling for hard real-time embedded systems," in *Proc. IEEE Design, Automation & Test in Europe Conf. & Exhibition, DATE'11*, 4 pp., Grenoble, France, 14-18 Mar. 2011.
- [40] 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.
- [41] Z. Li, C. Guo, X. Hua, and S. Ren, "Reliability guaranteed energy minimization on mixed-criticality systems," *J. Syst. Softw.*, vol. 112, no. 8, pp. 1-10, Feb. 2016.
- [6] S. Baruah, V. Bonifaci, G. D'Angelo, H. Li, A. Marchetti-Spaccamela, S. Van Der Ster, and L. Stougie, "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.
- [7] T. Park and S. Kim, "Dynamic scheduling algorithm and its schedulability analysis for certifiable dual-criticality systems," in *Proc. Int. Conf. on Embedded Software, EMSOFT'11*, pp. 253-262, Taipei, Taiwan, 9-14 Oct. 2011.
- [8] S. Baruah, H. Li, and L. Stougie, "Towards the design of certifiable mixed-criticality systems," in *Proc. Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp., RTAS'10*, pp. 13-22, Stockholm, Sweden, 12-15 Apr. 2010.
- [9] 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.
- [10] A. Taherin, M. Salehi, and A. Ejlali, "Stretch: exploiting service level degradation for energy management in mixed-criticality systems," in *Proc. Real-Time and Embedded Systems and Technologies, RTEST'15*, 8 pp., Tehran, Iran, 2-7 Oct. 2015.
- [11] S. Schreiner, K. Gruttner, S. Rosinger, and A. Rettberg, "Autonomous flight control meets custom payload processing: a mixed-critical avionics architecture approach for civilian UAVs," in *Proc. IEEE 17th Int. Symp. on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, ISORC'14*, pp. 348-357, Reno, NV, USA, 10-12 Jun. 2014.
- [12] J. Huang, et al., "Analysis and optimization of fault-tolerant task scheduling on multiprocessor embedded systems," in *Proc. of the 9th IEEE Int. Conf. on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, CODES+ISSS'11*, pp. 247-256, Taipei, Taiwan, 9-14 Oct. 2011.
- [13] 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.
- [14] P. Marwedel, *Embedded System Design, Vol. 1*, New York: Springer, 2006.
- [15] N. H. Weste and K. Eshraghian, *Principles of CMOS VLSI Design: A Systems Perspective*, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing, California, 1994.
- [16] A. Ejlali, B. M. Al-Hashimi, and P. Eles, "Low-energy standby-sparing for hard real-time systems," *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 329-342, Mar. 2012.
- [17] D. Zhu, R. Melhem, and D. Mosse, "The effects of energy management on reliability in real-time embedded systems," in *Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Computer-Aided Design, ICCAD'04*, pp. 35-40, San Jose, CA, USA, 7-11 Nov. 2004.
- [18] D. Zhu, "Reliability-aware dynamic energy management in dependable embedded real-time systems," in *Proc. Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp.*, pp. 397-407, San Jose, CA, USA, 4-7 Apr. 2006.
- [19] S. Hua, P. R. Pari, and G. Qu, "Dual-processor design of energy efficient fault-tolerant system," in *Proc. IEEE 17th Int. Conf. on Application-specific Systems, Architectures and Processors, ASAP'06*, pp. 42-54, Steamboat Springs, CO, USA, 11-13 Sept. 2006.
- [20] Y. Zhang and K. Chakrabarty, "Energy-aware adaptive checkpointing in embedded real-time systems," in *Proc. of the Conf. on Design, Automation and Test in Europe*, vol. 1, pp. 10918-10929, Munich, Germany, 7-7 Mar. 2003.
- [21] A. Ziv and J. Bruck, *An Online Algorithm for Checkpointing Placement*, 1995.
- [22] H. Lee, H. Shin, and S. L. Min, "Worst case timing requirement of real-time tasks with tim. on Real-Time Computing Systems and Applications. RTCSA'99", pp. 410-421, Hong Kong, China, 13-15 Dec. 1999.
- [23] A. Duda, "The effects of checkpointing on program execution time," *Information Processing Letters*, vol. 16, no. 5, pp. 221-229, Jun. 1983.
- [24] D. Zhu and H. Aydin, "Energy management for real-time embedded systems with reliability requirements," in *Proc. of the IEEE/ACM Int. Conf. on Computer-Aided Design, ACM*, pp. 528-534, San Jose, CA, USA, 5-9 Nov. 2008.
- [25] M. A. Haque, H. Aydin, and D. Zhu, "Energy-aware standby-sparing for fixed-priority real-time task sets," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 6, no. 16, pp. 81-93, Jun. 2015.

سیدحسین 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 هم اکنون هیأت علمی دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه پیام نور می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های نهفته اتکاپذیر، تحمل‌پذیری اشکال، قابلیت اطمینان، زمان‌بندی و طراحی سیستم‌های کم‌توان.

یاسر صداقت تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری کامپیوتر به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ در دانشگاه صنعتی شریف به پایان رسانده است. دکتر صداقت از سال ۱۳۹۰ در گروه مهندسی کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد مشغول به فعالیت گردیده و اینک نیز عضو هیأت علمی این گروه می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند سیستم‌های نهفته اتکاپذیر، طراحی نرم‌افزارهای مطمئن، سیستم‌عامل نهفته اتکاپذیر، شبکه‌های ارتباطی نهفته و طراحی سیستم‌های مبتنی بر FPGA و میکروکنترلرهای ARM می‌باشد.